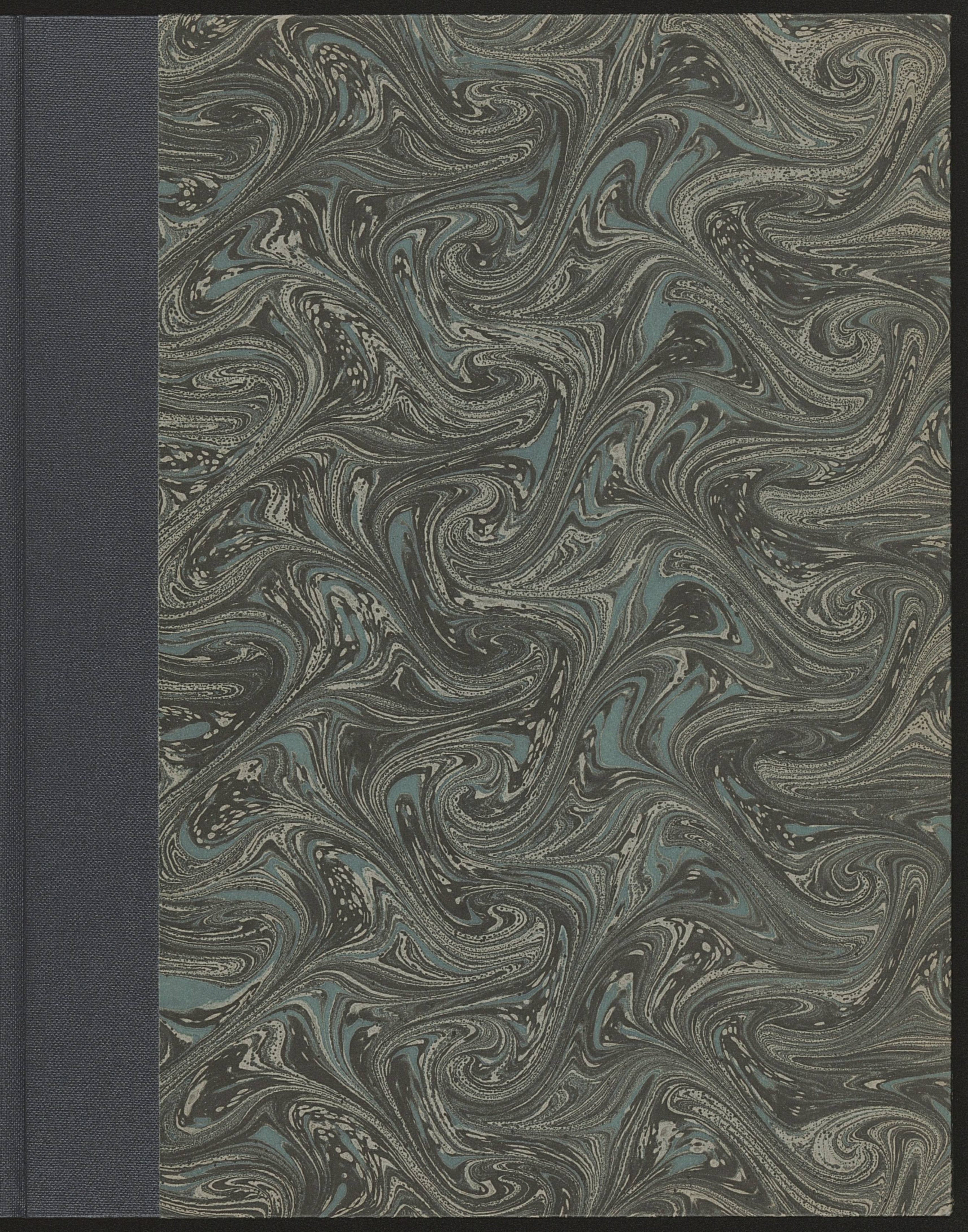
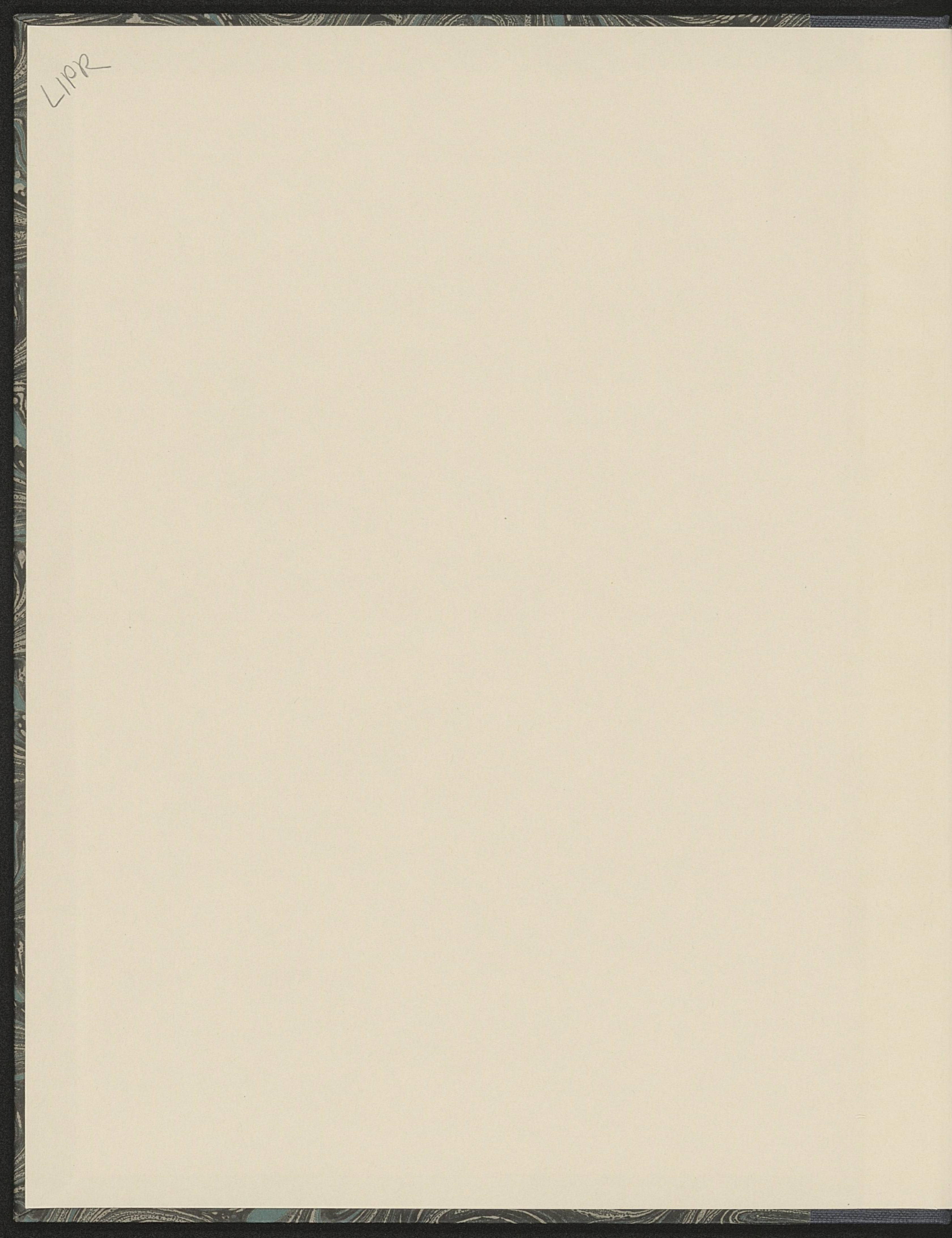



LIPR

MÉMOIRE

SUR LA

COMPRESSION DES LIQUIDES

ET LA

VITESSE DU SON DANS L'EAU

PAR

MM. D. COLLADON et C. STURM

1827

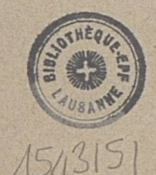
SUR LA TRANSMISSION DES SONS DANS L'EAU

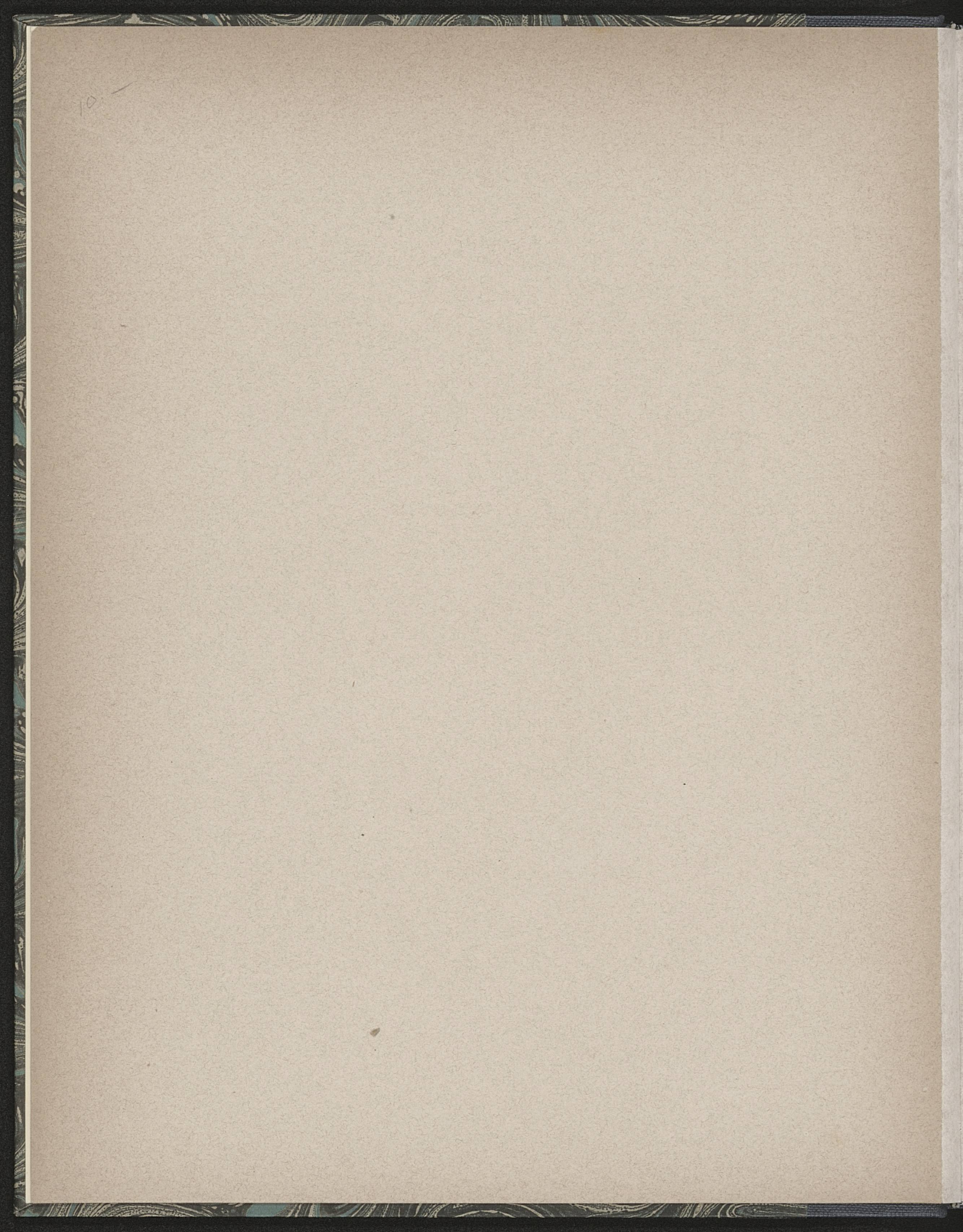
PAR

M. D. COLLADON

1841

GENÈVE
IMPRIMERIE CHARLES SCHUCHARDT
1887





MÉMOIRE

SUR LA

COMPRESSION DES LIQUIDES

ET LA

VITESSE DU SON DANS L'EAU

PAR

MM. D. COLLADON et C. STURM

1827

SUR LA TRANSMISSION DES SONS DANS L'EAU

PAR

M. D. COLLADON

1841

GENÈVE
IMPRIMERIE CHARLES SCHUCHARDT
1887

AVIS PRÉLIMINAIRE

Les exemplaires à part *de la compression des liquides et de la vitesse du son dans l'eau* ont été très peu nombreux et sont depuis longtemps épuisés.

Il en est de même du Mémoire de 1841 où M. Colladon indiquait *les nouvelles expériences de la transmission du son dans l'eau* et les applications possibles, soit pour vérifier dans les mers profondes, la hauteur de l'eau, soit pour transmettre télégraphiquement des dépêches entre des pays séparés par des bras de mer.

Je donne aussi les motifs pour lesquels j'ai renoncé à faire ces expériences télégraphiques qui n'auraient servi que peu d'années.

J'ai réuni dans un seul volume le mémoire couronné en 1827 et la notice publiée en 1841, qui ont exigé des explications et des planches identiques.

Il reste encore deux applications possibles :

La première, c'est de se servir dans les mers profondes, de l'écho des sons répercutés par le fond de la mer pour vérifier la profondeur.

La seconde, c'est d'établir des signaux pour transmettre à des navires des communications télégraphiques jusqu'à 60 ou 100 kilomètres ou même plus.

Dans les deux cas, le moyen de produire le son qui paraît tout indiqué, est celui qui m'a servi à communiquer en 1841 à cinquante kilomètres dans le lac de Genève, c'est-à-dire une forte cloche frappée par un lourd marteau.

MÉMOIRE

SUR

LA COMPRESSION DES LIQUIDES

PAR MM. D. COLLADON ET C. STURM

(CE MÉMOIRE A REMPORTÉ LE GRAND PRIX DES SCIENCES MATHÉMATIQUES PROPOSÉ PAR L'ACADÉMIE)

Séance publique du 11 juin 1827.

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

TOME V DES SAVANTS ÉTRANGERS [1]

Nous exposerons dans ce mémoire les principaux résultats de nos expériences sur la compressibilité des liquides et sur la vitesse de propagation du son dans l'eau.

Un corps liquide soumis à un accroissement de pression diminue de volume, et ne reprend son état primitif qu'au moment où la compression cesse d'agir ; ces différences de volume sont toujours très petites si on les compare à celles qu'éprouvent les gaz; elles croissent à peu près

[1] La réimpression de ce mémoire est complétée par le compte rendu des expériences nouvelles faites en 1841 sur la Transmission des sons dans l'eau, par M. D. C. (Académie des Sciences, *Comptes rendus*, t. XIII).

proportionnellement à l'augmentation de la pression, et il n'en résulte pour la température et la conductibilité électrique de ce corps que des changements presque inappréciables.

Les divers liquides ne se compriment pas également sous des accroissements égaux de pression, mais la compressibilité de chacun d'eux a une valeur constante, et qui ne varie qu'avec sa température ; en sorte qu'on pourrait reconnaître la nature d'un liquide en mesurant son volume sous diverses pressions.

Cette compressibilité spécifique est une propriété essentielle de ces corps, et sa détermination doit servir à compléter le tableau de leurs qualités élémentaires ; elle peut en outre conduire à la solution de plusieurs problèmes très importants de mécanique et de physique ; nous citerons comme exemples la théorie des moteurs et la mesure de la vitesse du son dans les corps liquides.

La chaleur, en pénétrant les corps et en écartant leurs molécules, produit dans l'intérieur de ces corps un travail qui peut être transmis, et dont la valeur dépend à la fois de l'étendue de la dilatation et de l'intensité de la pression que le corps peut exercer en se dilatant. On a souvent proposé d'employer dans ce but la dilatation des corps liquides comme on utilise celle des vapeurs et des gaz ; mais on ne pouvait calculer les avantages qui peuvent résulter de ces nouveaux moteurs sans connaître préalablement la résistance que chaque liquide oppose à la compression.

Quant à la vitesse de propagation du son, on sait, depuis les recherches de Young, de Laplace et de M. Poisson, sur ce sujet, que la mesure de cette vitesse dans une masse liquide peut se déduire de la densité de ce liquide et de sa compressibilité.

Nous avons entrepris de vérifier, par des expériences directes faites sur la vitesse du son dans l'eau du lac de Genève, les résultats de la formule qui sert à calculer cette vitesse : l'accord que nous avons trouvé entre les résultats déduits du calcul et ceux de l'expérience est un des faits les plus remarquables de la science.

Les premières expériences sur la compression des liquides ont été faites à la fin du dix-septième siècle par des physiciens florentins [1]. A cette époque les découvertes de Galilée et de Torricelli avaient attiré l'attention des savants sur les recherches de physique expérimentale ; les académiciens d'el Cimento qui travaillaient en commun à des expériences sur les propriétés des corps et des fluides impondérables, firent plusieurs tentatives pour déterminer si l'eau était sensiblement compressible. Le premier appareil qu'ils construisirent dans ce but était composé d'un long tube capillaire recourbé en U renversé, et terminé inférieurement par deux boules très épaisses *a* et *b*. La boule *b* et la partie adjacente du tube capillaire contenaient l'eau à comprimer ; une échelle fixée au tube devait servir à mesurer cette compression ; la seconde boule *a* était aussi remplie d'eau, et l'appareil était exactement fermé ; on faisait l'expérience de la manière suivante : la boule *b* était placée dans un vase rempli de glace, puis on chauffait fortement la boule *a;* le liquide en se dilatant diminuait le volume de l'air contenu dans le tube capillaire, et l'eau contenue dans la branche *b* supportait une forte pression. Cette expérience prolongée jusqu'à la rupture des appareils ne donna aucune diminution sensible de volume.

D'autres essais furent faits avec un appareil semblable à celui que l'on emploie pour vérifier la loi de Mariotte, et au moyen d'une colonne comprimante de mercure de vingt-quatre pieds de hauteur sans donner de résultats plus marqués.

Les académiciens d'el Cimento firent alors fabriquer une sphère d'argent à parois très épaisses. Cette sphère ayant été remplie d'eau et hermétiquement bouchée, ils la soumirent à des chocs violents ; la com-

[1] Plusieurs auteurs ont cité les résultats de l'expérience faite à Florence avec une sphère d'argent, mais nous n'avons trouvé dans aucun ouvrage élémentaire français les détails des autres expériences tentées par les savants florentins, non plus que la description des appareils ingénieux au moyen desquels Canton découvrit le premier la compressibilité de l'eau et de quelques autres liquides ; nous avons pensé faire acte de justice envers ce savant physicien anglais, en reproduisant avec quelques détails les dispositions principales de l'appareil qu'il avait employé dans ses expériences.

pression ayant déformé la sphère et diminué le volume intérieur, le liquide traversa les parois et parut en rosée sur la surface. Les savants florentins conclurent de ces expériences que la compressibilité de l'eau ne pouvait être rendue appréciable, et cette opinion fut partout adoptée.

En 1761, J. Canton, physicien très exact, découvrit le premier et essaya de mesurer la compression de l'eau et de quelques autres liquides[1] ; la méthode d'expérience qu'il imagina dans ce but est susceptible d'une grande précision, et elle a été adoptée depuis par tous ceux qui se sont occupés de recherches semblables.

Canton plaçait les liquides qu'il voulait comprimer dans des instruments en verre ou *piézomètres*, ressemblant à de gros thermomètres dont le tube serait ouvert ; pour éviter l'altération de forme qui aurait pu résulter d'une pression inégale sur les parois intérieures et extérieures de cet instrument, il eut l'ingénieuse idée de l'introduire dans un récipient entièrement clos, dans lequel il comprimait de l'air ; la pression se communiquait au liquide de l'instrument par l'extrémité de son tube. Les parois de cet appareil étaient ainsi comprimées exactement de la même manière sur leur face intérieure et extérieure, et ne subissaient aucune déformation. Pour éviter l'influence des changements de température, il plongeait la partie inférieure du récipient contenant la boule du piézomètre dans un réservoir d'eau placé sous le récipient.

Les expériences de cet habile physicien suffisaient pour démontrer que les liquides sont des corps compressibles ; mais comme il n'avait opéré que pour des différences de pression de deux ou trois atmosphères et sur un très petit nombre de liquides, dont plusieurs n'étaient pas très purs, les mesures de compressibilité qu'il a données ne sont pas suffisamment précises.

Aucune autre expérience remarquable sur la compressibilité des liquides n'a été publiée pendant le XVIIIme siècle ; ce n'est qu'en 1819 que de nouveaux essais de M. Perkins ont attiré l'attention sur ce sujet.

[1] *Transactions philosophiques*, 1762 et 1764.

Ces essais, publiés dans les *Transactions philosophiques* pour l'année 1820, ont démontré que l'eau est encore compressible sous de très fortes pressions, mais les valeurs qu'on en pourrait déduire pour la contraction absolue ne peuvent pas être admises comme exactes. De l'aveu même de M. Perkins les résultats obtenus dans deux expériences différentes ont varié du simple au double, et l'instrument à index qui devait servir à mesurer la compression ne pouvait l'indiquer qu'approximativement.

L'année suivante, M. le professeur Œrsted s'étant occupé de répéter les expériences sur la compressibilité de l'eau, apporta quelques perfectionnements à l'appareil de Canton [1] ; au lieu de comprimer de l'air dans le récipient qui contient le piézomètre, M. Œrsted a imaginé de le remplir complètement d'eau ; on évite ainsi l'influence du réchauffement de l'air sur le liquide du piézomètre. Ce savant ayant comprimé l'eau dans cet appareil depuis une pression d'un tiers en sus jusqu'à celle de six atmosphères, a trouvé que la diminution de volume est constante entre ces limites de pressions, et que la température du corps liquide n'éprouve pas de changement notable lorsque son volume diminue.

La compressibilité de l'eau d'après ces expériences serait de 45 millioniėmes par atmosphère à 15°. L'exactitude de ce nombre semble fort douteuse, et nous présenterons au sujet des expériences de M. Œrsted quelques remarques critiques qui nous paraissent fondées.

Ainsi, M. Œrsted s'est servi, pour déterminer les degrés de pression, d'un manomètre à air fort court, et l'air de ce manomètre était comprimé directement par l'eau du récipient. La propriété que l'eau possède d'absorber des quantités variables d'air lorsque la pression augmente devait influer nécessairement sur les indications de ce manomètre, et donner pour la compressibilité du liquide un nombre trop petit. M. Œrsted a aussi méconnu l'influence qu'exerce sur la contraction apparente du liquide la diminution de volume du piézomètre, dont les parois formées d'une substance compressible sont aussi contractées par l'accroissement

[1] *Annales de chimie et de physique*, tome XXII.

de pression ; en sorte que le changement de volume que l'on observe sur le liquide du piézomètre n'est que la différence entre la contraction réelle du liquide et celle d'un volume égal de la matière qui sert d'enveloppe.

On peut concevoir facilement cette influence en imaginant que le piézomètre dont on se sert pour ces mesures a un réservoir prismatique à base rectangulaire ; chaque paroi de ce prisme devant se contracter en tous sens proportionnellement à ses trois dimensions, le volume intérieur occupé par le liquide sera diminué, et si ce liquide était incompressible, la colonne dans le tube capillaire augmenterait de longueur par l'effet de la compression.

Nous avons étendu nos recherches à la plupart des liquides dont la composition chimique est exactement ou à peu près exactement déterminée, et pour presque tous ces liquides nous avons opéré avec des pressions successivement croissantes et décroissantes, depuis une jusqu'à vingt-quatre et même trente-deux atmosphères.

Les nombres que nous donnons dans ce mémoire pour la compressibilité spécifique de ces liquides ont été corrigés de l'influence de la contraction du verre, nous l'avons conclue d'expériences faites avec soin sur l'allongement que cette substance éprouve par la traction d'un poids.

Quelques mesures, sur l'exactitude desquelles nous avions conservé des doutes, ont été omises dans ce mémoire. Dans ce nombre plusieurs se rapportaient à des expériences sur la compressibilité de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique et du sulfure de carbone, pris à des températures très voisines des points d'ébullition de ces liquides, et distantes de ces points d'un même nombre de degrés. Ces expériences, destinées à confirmer une loi entrevue que nous n'avons pas cru devoir énoncer dans ce mémoire, nous ont présenté des obstacles si difficiles à surmonter, que nous avons dû renvoyer à un autre temps la suite de ces recherches.

La mesure de la compression des liquides est un des sujets d'expé-

riences qui exercent le plus la patience des observateurs. Lorsqu'on veut expérimenter à de très hautes pressions, on s'expose à faire rompre des appareils dont la préparation exige beaucoup de temps. Les variations les plus légères dans la température du piézomètre ont une telle influence, qu'on doit attendre à chaque opération que cette température et celle d'une grande partie de l'appareil soit devenue parfaitement stable; enfin quelques liquides résistent à toutes ces précautions, et ne peuvent être soumis que très difficilement à ces expériences de mesures. On peut citer comme exemples quelques éthers et le sulfure de carbone. Nous avons pris des précautions nombreuses pour éviter toutes ces causes d'erreur, et nous avons cherché à n'opérer que sur des liquides très purs. Le temps considérable que nous avons mis à ces expériences, qui nous ont exclusivement occupés pendant plusieurs mois, est la meilleure garantie de la précision de nos mesures. Le nombre de nos observations n'est pas très étendu, mais nous les avons vérifiées à plusieurs reprises, persuadés que quelques mesures exactes sont plus utiles pour l'avancement de la science que des résultats nombreux et mal observés. C'est à la patience et à la précision de quelques expérimentateurs modernes que sont dus en grande partie les progrès vastes et rapides que les sciences physiques ont faits depuis le commencement de ce siècle.

Ce mémoire sera divisé en TROIS PARTIES.

La PREMIÈRE contiendra la description de l'appareil employé pour mesurer la compression des liquides, les expériences relatives à la compressibilité du verre, et les tableaux des résultats trouvés pour le mercure, l'eau pure et saturée d'air, l'alcool, l'éther sulfurique, l'éther hydrochlorique, l'éther acétique, l'éther nitreux, l'acide sulfurique,

l'acide nitrique ou azotique, l'acide acétique, l'essence de térébenthine, le sulfure de carbone, l'eau en partie saturée de gaz ammoniac et l'eau de mer.

La SECONDE PARTIE traitera des expériences faites pour mesurer la chaleur que dégagent les liquides par l'effet de pressions fortes et rapides, ainsi que des essais que nous avons faits pour connaître l'influence d'une compression mécanique sur la conductibilité électrique de quelques liquides bons conducteurs.

Dans la TROISIÈME PARTIE nous donnerons le détail d'une série d'expériences faites par l'un de nous[1] sur la propagation du son dans l'eau, et nous comparerons les nombres obtenus par cette mesure expérimentale avec ceux qui résultent de l'application de nos mesures de compressibilité à la formule donnée par M. Poisson.

[1] M. D. C.

PREMIÈRE PARTIE

§ I

DESCRIPTION DE L'APPAREIL DE COMPRESSION

La mesure de la compressibilité d'un liquide ne peut être obtenue que par deux observations différentes, qui doivent être faites simultanément; par l'une de ces observations on détermine quel est l'accroissement de pression que l'on fait supporter au liquide; et par l'autre on mesure la diminution de volume produite par cet excès de pression.

Les appareils employés pour ces mesures se composent par conséquent de deux instruments principaux : l'un de ces instruments, destiné à mesurer la pression, sera appelé le *manomètre,* et l'autre, servant à indiquer la variation du volume liquide, sera appelé le *piézomètre.*

C'est de la disposition de ces deux instruments que dépend l'exactitude des résultats observés; et comme ces mesures portent sur des variations de volume excessivement petites, comme elles peuvent être influencées par des causes d'erreur très puissantes, la construction des appareils et l'emploi de ces instruments exigent des précautions nombreuses et une précision extrême.

Nous allons décrire les procédés qui nous ont servi pour la construction

et la graduation de notre appareil de compression, et la méthode d'expérience que nous avons adoptée dans l'emploi de cet appareil

DESCRIPTON DU PIÉZOMÈTRE

Le liquide dont on veut mesurer la compression est renfermé dans un instrument de verre assez semblable à un thermomètre à gros réservoir; cet instrument est représenté dans les figures 2 et 3, planche I; il est formé d'un long tube capillaire *uy*, à une des extrémités duquel est soudé un réservoir *r*, terminé par une pointe effilée; à l'autre extrémité du tube capillaire est un tube cylindrique *yz*, dont le diamètre intérieur est égal à quatre ou cinq millimètres.

Pour la construction de cet instrument il convient de choisir un tube capillaire qui soit parfaitement cylindrique sur une longueur de deux ou trois décimètres; on parvient à se procurer ces tubes en en calibrant un très grand nombre au moyen d'une petite goutte de mercure que l'on fait glisser le long du tube, et en mesurant sa longueur sur une petite échelle d'ivoire très mince, interposée entre la bulle et le jour.

Lorsqu'on est parvenu à trouver un de ces tubes dont une partie est cylindrique, on y introduit par tâtonnement une goutte de mercure, qui occupe sensiblement toute la longueur de cette partie cylindrique, puis avec un léger pinceau trempé dans une solution de résine on marque d'un trait fin les deux extrémités de la colonne de mercure; en inclinant ensuite le tube, on fait glisser cette colonne jusqu'à ce qu'elle soit arrivée à l'extrémité de cette première division; on marque alors une seconde division parfaitement égale en volume à la première, et on continue cette opération aussi longtemps que la longueur du tube le permet. La somme de ces divisions forme donc un volume multiple de celui de la portion cylindrique du tube. On remplit alors, toujours par une suite de tâtonnements, le tube capillaire d'une goutte de mercure, d'une grosseur telle qu'elle remplisse exactement la somme de toutes les

divisions du tube, puis on verse cette goutte dans une petite capsule en papier, que l'on place sur une balance d'essai. Son poids sert à déterminer exactement le volume qu'elle occupait dans le tube capillaire; en divisant ce volume par le nombre des divisions tracées sur le tube on a d'une manière très précise le volume de la fraction de ce tube, que l'on peut considérer comme parfaitement cylindrique. Si maintenant on place le long de cette partie cylindrique une échelle divisée en parties égales, chaque division ou chaque degré correspondra à une fraction parfaitement connue du volume du tube capillaire.

Toutes ces précautions sont indispensables dans la construction de cet instrument, destiné à indiquer des millionièmes de volume du liquide employé.

On soude ensuite, à l'une des extrémités du tube capillaire, un réservoir *r*, terminé par une pointe effilée ouverte *i*, et à l'autre extrémité un petit tube *yz*, de quelques millimètres de diamètre. Pour déterminer le volume du réservoir on le remplit de mercure en le plongeant dans une cloche renversée remplie de mercure bouilli à l'avance. Le mercure s'introduit très promptement, par l'effet de la différence de niveau, dans le réservoir en y pénétrant par la pointe effilée *i* qui le termine. On achève alors de remplir la portion du tube capillaire placée entre l'échelle divisée et le réservoir, et l'on marque par un point *i* l'extrémité de la masse de mercure du côté de la pointe du réservoir, en ayant soin d'opérer à une température uniforme. Le mercure contenu dans le piézomètre est ensuite vidé dans une coupe, et on le pèse très exactement. Cette seconde pesée sert à déterminer le rapport entre le volume total du liquide qui remplira le piézomètre et le volume de chacune des divisions de son tube capillaire.

Cette opération terminée, on remplit le piézomètre du liquide dont on veut mesurer la compressibilité, en l'introduisant également par la pointe ouverte du réservoir, puis lorsqu'il est entièrement plein, on ferme à la lampe l'extrémité du réservoir au point *i* (voyez figure 3).

Ce procédé est extrêmement commode, et il est souvent le seul que

l'on puisse employer, soit lorsqu'on veut mesurer la compression de liquides saturés de gaz, soit lorsqu'on opère sur des liquides qui se décomposent facilement par la chaleur [1].

Le tube *yz* qui termine le piézomètre est ouvert et plein d'air ; cet air sert d'intermédiaire entre l'eau qui environne le piézomètre et le liquide qui y est contenu, et empêche le contact des deux liquides.

Canton et M. Œrsted se sont servis d'un index de mercure pour empêcher ce contact et marquer l'extrémité de la colonne dans le tube capillaire. Nous avons trouvé que l'emploi de cet index est sujet à plusieurs inconvénients. Quelques liquides, tels que le carbure de soufre, l'essence de térébenthine, divisent cet index en un grand nombre de petits globules, et passent facilement entre les parois du tube et l'index; lorsque l'on fait varier la pression d'une manière subite, l'index, par suite de la vitesse acquise et de la différence de la masse, pénètre dans la colonne liquide avec laquelle il est en contact. Enfin, l'on sait qu'une bulle de mercure logée dans un tube très capillaire ne s'y meut que par une différence de pression de quelques centimètres de mercure; ainsi l'emploi d'un index de ce métal occasionne une différence de pression nuisible contre les parois intérieures et extérieures du piézomètre.

Tous ces inconvénients nous ont fait renoncer à l'emploi de cet index; nous avons préféré observer directement l'extrémité de la colonne liquide, qu'il est toujours facile de distinguer; pour les liquides très hygrométriques, nous avons employé un très petit index de sulfure de carbone.

D'après la méthode de Canton, adoptée par M. Œrsted, nous avons placé le piézomètre ouvert dans un vase plein d'eau, et nous avons comprimé directement l'eau de ce vase avec une pompe de compression; la figure 1, planche I, représente cette disposition.

AB est le vase plein d'eau contenant le piézomètre; c'est un fort cylindre de verre terminé à son extrémité B par une virole en cuivre à

[1] Nous avons employé un piézomètre spécial pour chacun des liquides observés.

laquelle on visse la pompe CD ; un petit treuil F fixé sur cette pompe sert, au moyen de la corde *cc* et de la tige EE, a faire avancer le piston lorsque l'on veut comprimer l'eau du vase AB.

Nous avons placé le cylindre AB dans une position horizontale, afin d'éviter les mouvements du liquide contenu dans ce cylindre, dont toutes les parties n'avaient pas nécessairement la même température.

Un piézomètre, construit comme nous venons de le dire, peut être considéré comme un thermomètre extrêmement sensible, et sur lequel de légères variations de température produiraient des variations dans la longueur de la colonne capillaire qui altéreraient complètement les résultats de compression : cette cause d'erreur est tellement puissante, que pour le mercure, par exemple, une variation de température de $\frac{1}{55}$ de degré centigrade occasionne une variation de longueur égale à celle que produirait une différence de pression d'une atmosphère.

Les expériences de compression sur les liquides doivent donc être faites avec assez de soin pour que l'on puisse éviter l'influence des variations de température sur le piézomètre, ou du moins sur le réservoir de cet instrument; et comme quelques-unes de ces expériences doivent se prolonger pendant plusieurs minutes, l'appareil doit être construit de telle sorte que le liquide en expérience ne puisse varier de température pendant tout ce temps.

Pour y parvenir nous avons introduit l'extrémité A du cylindre de verre AB dans une caisse en métal M pleine d'eau légèrement épaissie par une solution d'empois, afin d'en rendre les mouvements moins faciles. Le vase M, d'une capacité d'environ 50 litres, était muni de thermomètres, dont l'un *tt* était appliqué immédiatement sur l'extrémité A du cylindre.

L'appareil était placé dans une petite chambre n'ayant qu'une seule fenêtre; on élevait ou on abaissait la température de cette chambre suivant le degré de température auquel on voulait opérer, de manière à avoir autant que possible la même température dans l'eau du réservoir M et dans l'air environnant.

Lorsque l'extrémité de la colonne du piézomètre indiquait par son immobilité que la température de cet instrument était parfaitement fixe ainsi que celle du thermomètre *tt*, on comprimait le liquide du vase AB en faisant tourner le petit treuil F, l'eau du cylindre AB communiquait sa pression au liquide du piézomètre à travers le tube ouvert *yz* et l'on observait avec une petite lunette les mouvements du sommet de la colonne liquide le long de l'échelle *nn*.

L'expérience terminée, on observait de nouveau la longueur de la colonne du piézomètre et l'indication du thermomètre *tt*; si ces deux indications n'avaient pas changé, on était certain que la température du piézomètre n'avait pas varié pendant la durée de l'expérience.

Pour des mesures prises à des températures plus élevées nous avons logé le vase cubique dans une seconde enveloppe plus grande, et l'espace intermédiaire a été rempli d'une poussière peu conductrice; on échauffait peu à peu l'eau de la caisse M, et on saisissait pour l'expérience l'instant où la température de l'eau de ce vase atteignait un maximum.

Outre les variations de température, trois autres causes d'erreur pourraient encore influencer sur les indications du piézomètre, savoir : l'adhérence d'une portion du liquide aux parois du tube capillaire, la diminution de pression due au frottement de la colonne liquide dans ce tube, enfin les petites quantités d'air adhérentes aux parois intérieures du piézomètre.

On remédie aux deux premières causes en faisant deux séries d'expériences, l'une pour des pressions croissantes et la seconde pour des pressions décroissantes; on évite presque complètement l'influence de la dernière cause, soit en faisant bouillir à l'avance le liquide du piézomètre, soit en employant des pressions très puissantes.

DESCRIPTION DU MANOMÈTRE

La partie du manomètre destinée à mesurer l'intensité de la pression doit être aussi construite avec soin, et ses indications doivent être mises

à l'abri des variations de température et des influences diverses qui tendent à les altérer. La construction d'un bon manomètre n'est point une chose facile, surtout lorsque ce manomètre doit servir pour des expériences à de hautes pressions.

Le manomètre à air dont nous nous sommes servis est représenté dans les figures 1, 4 et 5, planche I; il est formé de trois tubes d'inégal diamètre *pq*, *qx* et *xs*, figure 5, et il est muni dans toute sa longueur d'une échelle divisée en parties égales.

Ce manomètre fermé à sa partie supérieure se place dans un cylindre de verre vertical KL, figures 1 et 4. Ce cylindre de verre est fermé dans sa partie inférieure, et son extrémité supérieure L se visse à un tube recourbé GGG, par l'intermédiaire duquel le cylindre KL communique avec le cylindre AB.

Le cylindre de verre KL contient dans sa partie inférieure du mercure jusqu'en *m*, et dans ce mercure plonge l'extrémité inférieure ouverte du manomètre *ps*.

Lorsque l'appareil est ainsi disposé, on ouvre le robinet *o*, placé au sommet du tube recourbé GG, et on remplit d'eau tout l'appareil; l'air qu'il contenait se dégage peu à peu par cette ouverture supérieure; on ferme ensuite le robinet *o*, et si l'on fait marcher la pompe, la compression se transmet à l'air du manomètre par l'intermédiaire de la colonne liquide GGLK, et le mercure s'élève dans le tube manométrique *p s*.

La graduation directe de ce manomètre d'après les lois de la compressibilité de l'air aurait présenté plusieurs difficultés; le procédé que nous avons adopté nous paraît à l'abri de toute chance d'erreur, et donne immédiatement la graduation du manomètre d'après les degrés de pression que supporte l'eau contenue dans le cylindre horizontal AB où doit être placé le piézomètre.

Nous avons fait construire un tube *abcd*, figure 6, long d'environ deux mètres, composé de deux parties soudées; l'une *ab*, à peu près cylindrique, est un tube ordinaire en verre, d'environ trois millimètres de diamètre intérieur; l'autre partie *cd*, rendue conique en l'étirant à la lampe, a un diamètre qui diminue jusqu'à son extrémité *d*.

On laisse d'abord l'extrémité *d* ouverte, et l'on gradue ce tube dans toute sa longueur en un très grand nombre de parties égales en volume au moyen de gouttes de mercure que l'on y fait cheminer, en marquant à la résine les extrémités. On vérifie plusieurs fois cette division en employant des bulles de mercure de plus en plus fortes, puis l'on ferme l'instrument à son extrémité *d ;* lorsque l'air qu'il contient a une température convenable, on fait arriver jusqu'à l'origine *a* de la division une bulle de mercure qui doit servir d'index.

Cet instrument ainsi divisé est introduit dans le cylindre horizontal AB, figure I, à la place du piézomètre, qu'il remplace momentanément, puis on comprime l'eau du cylindre AB. La bulle de mercure chemine alors en parcourant successivement les divisions tracées sur la longueur *abcd,* et dont chacune correspond à un degré de compression connu ; en même temps le mercure contenu dans le bas du cylindre vertical KL s'élève dans le manomètre *pqxs* muni d'une échelle graduée. On établit ainsi une table de ces hauteurs et des pressions correspondantes dans le tube AB ; cette table une fois faite, si on enlève le tube *abd* du cylindre AB et que l'on y place un piézomètre, on sera sûr, chaque fois que l'on ramènera par la compression le mercure du manomètre *ps* à une hauteur donnée, que le liquide du piézomètre logé dans le cylindre horizontal supporte une pression bien déterminée.

Dans le cas où la température de l'air du manomètre aurait varié, il est facile d'en tenir compte ; à cet effet on place dans le cylindre KL deux petits thermomètres *tt*, destinés à indiquer cette température.

Cette méthode de graduation suppose, il est vrai, que l'air comprimé obéit exactement à la loi de Mariotte jusqu'à une pression de 30 ou 40 atmosphères. Nous n'avons pu vérifier cette loi jusqu'à d'aussi fortes pressions ; mais nous nous sommes assurés, par une série d'expériences de compression faites à Genève en 1825, que cette loi de compressibilité des gaz est sensiblement exacte pour toutes les pressions moindres que 16 atmosphères. Dans cette expérience la tubulure de l'extrémité B du cylindre AB était mise en communication avec un baromètre ouvert à mercure

haut de $12^m,3$, et les pressions se mesuraient directement sur ce baromètre. Ayant introduit dans le cylindre horizontal un tube construit et gradué comme celui de la figure 6, les indications de cet instrument nous ont paru coïncider parfaitement avec celles de la colonne barométrique [1].

On pouvait craindre que les variations de température causées par les changements de volume de la colonne d'air du manomètre n'altérassent les indications de celui-ci, mais il faut remarquer que ce manomètre *ps* se trouvant amplement environné d'eau, ses parois absorbent et transmettent promptement à cette eau la petite quantité de chaleur dégagée par la compression, d'autant mieux que cette compression n'était jamais instantanée; on opérait avec lenteur pour éviter des disjonctions dans la colonne du tube capillaire du piézomètre, et on maintenait chaque pression pendant quelques instants.

§ II.

COMPRESSIBILITÉ DU VERRE

Nous avons dit précédemment que Canton, dans le but d'éviter la déformation du réservoir de ses piézomètres, avait eu l'heureuse idée de les plonger dans un récipient fermé où l'on faisait varier la pression ; par ce moyen on évite, il est vrai, d'altérer la forme de ce réservoir, puisque la pression se transmet également sur tous ses points à l'intérieur et à l'extérieur; mais cette pression produit sur la matière de ce réservoir une diminution de volume qui influe sur la contraction apparente du liquide contenu. Cette conclusion repose sur ce principe assez évident, qu'un corps

[1] Pendant le temps qui s'est écoulé entre la présentation de ce mémoire et son impression, MM. Arago et Dulong ont vérifié, par des expériences très précises, la parfaite coïncidence d'un manomètre gradué d'après la loi de Mariotte et les indications d'une colonne barométrique, depuis 1 jusqu'à 30 atmosphères. Cette expérience, d'une grande importance pour plusieurs recherches de physique, justifie l'exactitude des nombres qui, dans nos tableaux, représentent les pressions.

solide homogène, plongé dans un fluide et soumis à une pression uniforme, éprouve, selon chacune de ses dimensions, une diminution proportionnelle à leur grandeur, et se contracte en conservant une forme semblable à sa forme primitive.

Supposons en effet que ce corps solide est un prisme parallélipipède plein dont les trois dimensions ont une mesure connue, et divisons par la pensée ce prisme par des plans parallèles à chacune de ses bases en un grand nombre de petits cubes tous égaux entre eux.

Lorsque la compression sera opérée et l'équilibre établi, ces molécules cubiques supporteront nécessairement sur leurs faces opposées des pressions égales, et cette pression sera la même pour toutes. Ainsi chacune de ces particules cubiques se contractera également selon ses trois dimensions, et le corps, après avoir diminué de volume, conservera une forme semblable à celle qu'il avait avant la compression.

Si maintenant dans ce prisme ainsi contracté, et dont toutes les molécules sont parvenues à un état fixe d'équilibre, on enlève un prisme intérieur semblable plus petit, et si on remplace ce solide par un volume égal de liquide, dont les molécules soient dans le même état de tension, chaque face de ce prisme liquide produira, sur les faces contiguës du prisme enveloppant, une pression parfaitement égale à la réaction qu'exerçaient auparavant les faces homologues du prisme solide dont il a pris la place ; rien ne sera changé pour l'état d'équilibre des molécules enveloppantes ; et comme avant cette substitution le noyau solide avait dû être contracté proportionnellement à sa compressibilité, le volume occupé par le liquide sera diminué, dans le second cas, de la même quantité.

Cette conclusion suppose que la tension du fluide intérieur est égale à celle du fluide qui environne le piézomètre ; cette condition est toujours remplie lorsqu'on fait usage de la méthode de Canton, puisque la pression extérieure se transmet librement au liquide du piézomètre.

En raisonnant de la même manière pour un piézomètre dont le réservoir aurait une forme prismatique quelconque ou une forme cylindrique, on arrive également à cette conclusion, que dans l'emploi de ce piézo-

mètre le volume intérieur occupé par le liquide diminue, pendant la compression, de la même quantité dont diminuerait, sous une pression égale, une masse solide de même matière que l'enveloppe, et d'un volume équivalent à celui du liquide comprimé.

La méthode que l'on a coutume d'employer pour déterminer les diminutions de volume des corps solides par la pression, consiste à mesurer le raccourcissement ou l'allongement linéaire d'une barre prismatique, et à en conclure la dilatation ou la contraction cubique. Cette méthode suppose que les variations de longueur sont assez petites pour que cet allongement ou ce raccourcissement ne modifie pas sensiblement la position relative des molécules ; il faut par conséquent dans ces mesures apprécier de très petits allongements, et faire usage d'un appareil disposé de manière que l'on n'ait point à redouter l'influence de la dilatation des supports et de la barre ou celle de la flexion des appuis qui soutiennent la barre chargée de poids.

L'appareil qui nous a servi pour l'allongement du verre est figuré dans la planche II, figures 1 et 2.

AB est la baguette dont on veut mesurer l'allongement, on la suspend par son extrémité A, et on fixe en B un plateau p, pour y placer des poids ; à cette baguette on fixe, par sa partie supérieure, avec du mastic de résine, un tube CD également en verre ; ce tube, long d'un mètre, enveloppe la baguette AB à laquelle il est suspendu ; c'est à la partie inférieure D de ce tube que l'on fixe l'appareil destiné à la mesure des allongements du cylindre AB. On voit que par ce procédé très simple cet appareil de division conserve toujours la même position par rapport à l'extrémité supérieure du cylindre AB, et que la position de l'index est indépendante des variations ou des flexions des supports. Si de plus la température venait à varier, le cylindre et le tube étant à peu près contigus dans toute leur longueur et ayant des dilatations égales, cette variation ne changerait rien à la mesure observée pour l'allongement.

Dans une première tentative nous avons mesuré directement l'allongement du cylindre de verre AB, en adaptant au bas de ce cylindre une

petite échelle micrométrique d'un millimètre, divisé en cent parties, et en fixant au tube un index très fin, qui glissait le long de cette échelle; on observait les mouvements relatifs du micromètre et de l'index au moyen d'un fort grossissement.

Nous avons aussi fait modifier cet appareil de manière à obtenir une indication plus facile à observer : cette disposition est représentée dans les figures 1 et 2 ; *ss* est un appendice soudé au tube et terminé par un petit couteau *t ;* un autre couteau *u* est fixé au bas du cylindre de verre et appuye sur un levier très léger *ll ;* ce levier tourne sur le tranchant du couteau *t*, et parcourt à son extrémité le cercle divisé *mn*. Un second levier *l'l'*, supporté de la même manière sur le côté opposé du cylindre, sert à contrôler les indications du levier *ll*.

La moyenne des résultats obtenus par ces deux procédés différents nous a donné un allongement de $\frac{6}{100}$ de millimètre sous l'influence d'un poids de huit kilogrammes ; la longueur de la barre soumise à cet allongement étant exactement d'un mètre. Il est facile de déduire de ce résultat la contraction linéaire correspondante à une pression atmosphérique ; la surface de section du cylindre était équivalente à 13 $^{1}/_{3}$ millimètres carrés. Il fallait, pour produire une traction équivalente à une atmosphère, un poids égal à celui d'un cylindre de mercure haut de 760 millimètres et ayant une base de 13,3 millimètres carrés. Le poids d'un pareil cylindre est de 138,3 grammes, par conséquent les 8 kilogrammes produiraient une traction équivalente à 57 atmosphères. En divisant l'allongement observé, savoir $\frac{6}{100}$ de millimètres par 57, on trouve que pour une atmosphère l'allongement de la baguette de verre d'un mètre de longueur est de 11 dix-millioniémes; une pression correspondante à une atmosphère, agissant sur les deux extrémités de la barre, la raccourcirait de la même quantité. On peut conclure de là la diminution linéaire que le corps éprouverait s'il était soumis à cette même pression d'une atmosphère sur tous les points de sa surface.

M. Poisson a démontré, dans un mémoire sur l'équilibre des corps élastiques, que cette dernière contraction n'est que la moitié de la pre-

mière ; en sorte qu'un cylindre de verre plongé dans un fluide et soumis à une pression de $0^m,76$ de mercure, se comprime de 165 cent-millioniêmes de son volume primitif. Ce nombre, exprimant la compressibilité spécifique du verre, doit être ajouté à ceux qui représentent la contraction apparente des liquides pour chaque accroissement de pression d'une atmosphère [1].

§ III.

EXPÉRIENCES SUR LA COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES

Les nombres contenus dans les tableaux de ce chapitre sont ceux que nous avons trouvés dans nos expériences, et que nous donnons sans aucune correction. La première colonne des pressions renferme les indications du manomètre à air contenu dans le cylindre vertical KL, planche I. L'aide qui opérait la pression au moyen du treuil F ramenait la colonne de ce manomètre à des hauteurs toujours égales, et la maintenait à la même pression pendant le temps nécessaire pour chaque observation. Les indications contenues dans cette première colonne doivent être corrigées de la variation de température pour chaque expérience. Les nombres contenus dans la seconde colonne sont les lectures sur l'échelle adaptée au piézomètre ; ces nombres ou degrés correspondent à des fractions de volume de la portion cylindrique du tube capillaire ; pour en conclure la contraction il faut les comparer au volume du réservoir de

[1] Dans le mémoire original que nous avons déposé à l'Institut en 1827, et que les rédacteurs des Annales de chimie et de physique ont publié dans le tome XXXVI de ce recueil, nous avions supposé que la contraction linéaire δ d'une barre, comprimée également sur toute sa surface, était égale à celle δ' d'une barre égale comprimée seulement par ses extrémités, et nous avions en conséquence supposé la contraction cubique du verre égale à 303 cent-millioniêmes. M. Poisson ayant démontré depuis que la valeur de δ' est double de celle de δ, nous avons dû admettre cette correction en publiant nos résultats.

chaque piézomètre exprimé aussi en degrés. Ce rapport est indiqué en tête de chaque tableau sous le titre de VOLUME PRIMITIF DU LIQUIDE.

Il faut en outre corriger la contraction déduite de cette comparaison de l'influence de la contraction de l'enveloppe. Nous donnons à la suite de chaque tableau le calcul relatif à cette double correction.

Quelques-uns de ces tableaux sont suivis de tableaux semblables ayant pour titre EXPÉRIENCES EN RETOUR ; ils contiennent une seconde suite d'observations faites à des pressions successivement décroissantes et destinées à vérifier les premières.

On remarquera que le plus grand nombre des observations contenues dans ce chapitre ont été faites à la température de la glace fondante. Le choix de cette température rendait encore plus certaine la fixité de la température du piézomètre. Quelques autres expériences ont été faites à des températures de 10 et 11 degrés ; elles font partie d'une série de mesures que nous avions entrepris de faire sur les principaux liquides à cette seconde température ; mais le temps limité du concours et la difficulté de ces mesures n'ayant pas permis de vérifier suffisamment toutes les observations relatives à cette double série, nous avons choisi dans chacune les tableaux dont on avait eu le temps de vérifier les résultats.

L'une des difficultés principales que l'on rencontre lorsqu'on veut opérer à une température autre que celle de la chambre qui contient l'appareil, provient de la dilatation prodigieuse de la colonne capillaire. Si l'on n'a pas su prévoir la quantité précise de liquide qu'il convient de laisser dans l'instrument, il arrive que lorsque le piézomètre a été placé dans le cylindre AB, et qu'il a pris exactement la température de la caisse M, ce qui nécessite un temps assez long, l'extrémité de la colonne ne coïncide plus avec le commencement de l'échelle *nn'*. Il faut alors retirer le piézomètre pour y introduire une nouvelle goutte de liquide et recommencer la même opération.

Dans quelques-uns des piézomètres que nous avons employés la colonne capillaire s'allongeait de près de 200 millimètres pour un réchauf-

fement d'un degré centigrade ; on peut comprendre d'après cela combien était difficile l'appréciation dont nous venons de parler.

I

COMPRESSIBILITÉ DU MERCURE A 0°

La compressibilité de ce liquide a été observée par Canton, qui l'avait jugée égale à 304 cent-millionièmes pour une pression de $0^m,76$ de mercure. Nous avons fait remarquer que ce physicien avait oublié de tenir compte de l'influence de la contraction de l'enveloppe, et que ses expériences n'ont pas été étendues au delà de trois atmosphères de pression; aussi ce nombre, qu'il a donné dans les *Transactions philosophiques,* ne pouvait être adopté que comme une mesure approximative.

Nos expériences sur le mercure ont été faites avec tout le soin qu'exigeait la petitesse des quantités qu'il fallait mesurer, et nous avons poussé nos mesures pour ce liquide jusqu'à 30 atmosphères. La caisse M était remplie de glace fondante, qui entourait complètement l'extrémité A du cylindre et le maintenait à un degré fixe de température, ainsi que le réservoir du piézomètre qui y était contenu.

La fixité de la température est une condition encore plus essentielle pour ce liquide que pour tout autre ; si elle variait d'un cinquantième de degré, il en résulterait un changement de volume plus grand que celui que pourrait produire la pression d'une atmosphère. Les quatre séries que contiennent les deux tableaux suivants indiquent, par la constance des indications, que la température du piézomètre était parfaitement stable.

MERCURE A 0°. — VOLUME PRIMITIF DU LIQUIDE = 622440 DEGRÉS DU TUBE CAPILLAIRE. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 9° [1].

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	242,5			
		1	2,3	2,3
2	244,8			
		1	1,2	1,2
3	246			
		1	2	2
4	248			
		1	1,6	1,6
5	249,6			
		1	1,2	1,2
6	250,8			
		2	2,2	1,1
8	253			
		2	2,1	1,05
10	255,1			
		2	1,9	0,95
12	257			
		2	2	1
14	259			
		2	1,9	0,95
16	260,9			
		2	2,1	1,05
18	263			
		2	2	1
20	265			
		2	2	1
22	267			
		2	2,1	1,05
24	269,1			
		6	5,9	0,983
30	275			
		RETOUR		
24	270			
			4,1	1,025
20	265,9	4		
			6,2	1,033
14	259,7	6		
			3,7	0,925
10	256	4		
			10,8	1,35
2	245,2	8		

[1] Ces deux expériences faites à Genève en 1826 sont les seules de celles mentionnées dans ce mémoire pour lesquelles la température normale du manomètre était = 9°, ce manomètre ayant été remplacé dans les expériences faites à Paris par un autre gradué à la température de 10° centigrades.

SUITE DU TABLEAU PRÉCÉDENT.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	242,5			
		2	3,5	1,75
3	246			
		3	4,8	1,6
6	250,8			
		3	3,2	1,066
9	254			
		3	3	1
12	257			
		3	3	1
15	260			
		3	3	1
18	263			
		3	3,2	1,066
21	266,2			
		3	3	1
24	269,2			
		6	5,8	0,966
30	275			
RETOUR				
24	270			
		4	4	1
20	266			
		6	6,4	1,066
14	259,6			
		5	4,6	0,92
9	255			
		7	9,8	1,4
2	245,2			
		1/2	1,2	2,4
1 1/2	244			

La contraction n'est pas uniforme dès le commencement ; ce n'est guère qu'à partir de la sixième atmosphère qu'elle devient régulière et constante. La régularité des résultats obtenus pour de plus fortes pressions indique que ces variations ne proviennent pas d'une diminution de compressibilité du mercure ; nous les avons attribuées à l'influence de la très petite quantité d'air qui reste adhérente aux parois du verre malgré l'ébullition du mercure dans l'instrument. Si c'est la véritable cause de ces différences, on comprend que ces petites bulles doivent être réduites

à un si faible volume, quand la pression a atteint cinq ou six atmosphères, que leur influence s'annule entièrement.

A partir de la huitième atmosphère on a exactement un degré de contraction moyenne ; le manomètre qui a servi à ces expériences avait été gradué sous une pression barométrique de $0^m,706$ de mercure et à la température de 9° c. Il n'y a donc aucune correction à faire pour sa température, mais il faut augmenter les résultats observés dans le rapport de 760 à 706 pour obtenir la contraction correspondante à des atmosphères de $0^m,760$ de mercure. En faisant cette correction sur la contraction observée, qui est égale à $\frac{1}{622440}$ pour chaque atmosphère de $0^m,706$, on trouve que pour des pressions de $0^m,760$ la contraction apparente du mercure dans un piézomètre de verre est de 173 cent millioniémes. Si à cette contraction on ajoute celle de l'enveloppe, 165 cent millioniémes, *on trouvera la compressibilité vraie du mercure à zéro = 338 cent millioniémes.*

L'observation de Canton sur la compression du mercure donne 469 cent millioniémes, lorsqu'elle a été corrigée de la compression du verre. Nous avons déjà fait la remarque que ce physicien n'a expérimenté que jusqu'à trois atmosphères, pression trop faible, surtout pour les liquides peu compressibles ; les premiers nombres de nos tableaux jusqu'à six atmosphères environ donnent à peu près la même contraction de 471 cent millioniémes. Il est probable que la même cause qui nous a donné une contraction apparente trop forte pour les premières pressions aura influé dans l'expérience de Canton.

REMARQUES ADDITIONNELLES

I° La densité du mercure à 0° est égale à 13,568 ; en introduisant dans la formule de la vitesse du son citée à la fin de ce mémoire les nombres qui représentent la densité et la compressibilité du mercure, on trouve que *la vitesse de propagation du son dans ce métal serait égale à 1483 mètres à la température de 0°.*

II° En comparant la contraction 338 cent millionièmes avec la dilatation produite entre zéro et cent degrés par chaque degré de réchauffement du mercure, on trouve que *la pression de cinquante-trois atmosphères produit la même réduction de volume qu'un degré de refroidissement,* et l'on peut conclure de ce rapprochement que dans les thermomètres à mercure non purgés d'air, la compression produite par cet air, quand la colonne capillaire s'allonge, n'exerce pas d'influence sensible sur le volume du liquide.

III° En calculant la quantité de travail ou de force vive que l'on pourrait obtenir de la dilatation du mercure pour un kilogramme de charbon brûlé, on trouve que, s'il était possible de renfermer ce liquide dans des vases inextensibles, de l'y réchauffer et refroidir alternativement, en recueillant sur un piston le travail produit par ces variations de volume, chaque kilogramme de charbon brûlé (en supposant, comme on le fait pour les bonnes machines à vapeur, que l'on utilise les deux tiers seulement de la chaleur dégagée par la combustion de ce kilogramme) produirait environ mille dynamies, et si les frottements du piston et des autres pièces frottantes absorbaient un tiers de cette puissance, *l'effet utile recueilli serait égal à 666 dynamies ou au travail d'un cheval de machine pendant deux heures et demie, effet triple ou quintuple de celui que l'on obtient dans les meilleures machines à vapeur.*

II

COMPRESSIBILITÉ DE L'EAU

1° EAU DISTILLÉE PRIVÉE D'AIR PAR L'ÉBULLITION.

L'eau sur laquelle nous avons opéré avait subi plusieurs ébullitions

dans le réservoir du piézomètre pour la séparer de l'air qu'elle contenait. Il est important d'observer qu'une première ébullition n'est jamais suffisante ; à la sixième et même à la huitième ébullition il se dégage encore des bulles qui ne disparaissent que par le refroidissement. Pour cette expérience et celles qui suivent, le manomètre avait été changé ; ce dernier avait été gradué, le baromètre étant à $0^{m},7466$ et le thermomètre à 10° centigrades.

Le piézomètre dont nous avons fait usage dans cette expérience est le même qui nous a servi à mesurer la compression de l'eau saturée d'air (voyez le IIIe tableau) ; la position seule de l'échelle avait été intervertie dans les deux opérations. Nous avons mesuré en premier lieu la compression de l'eau avec ou sans air dans deux piézomètres différents : frappés de la diminution sensible de compressibilité indiquée par ces deux expériences, nous avons désiré la constater par un essai décisif, en opérant à la même température et dans le même vase ; en conséquence, après que les essais sur l'eau saturée ont été achevés, nous avons fait bouillir cette eau dans son piézomètre, nous en avons dégagé l'air avec soin, et nous avons recommencé une nouvelle série de compressions qui est celle du tableau suivant. Les nombres de cette expérience confirment à une très petite fraction près ceux que nous avons obtenus avec un piézomètre différent.

EAU DISTILLÉE ET PRIVÉE D'AIR A 0°. — VOLUME PRIMITIF = 237300 DEGRÉS DU TUBE CAPILLAIRE. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°.

TEMPÉRATURES de $0^m,7466$.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION par atmosphère.
1	211			
		1	12	12
2	223			
		2	$22\frac{1}{4}$	$11\frac{1}{8}$
4	$245\frac{1}{4}$			
		2	$22\frac{3}{4}$	$11\frac{3}{8}$
6	268			
		2	$22\frac{1}{5}$	$11\frac{1}{10}$
8	$290\frac{1}{5}$			
		2	$24\frac{1}{20}$	12
10	$314\frac{1}{4}$			
		2	$21\frac{1}{4}$	$10\frac{5}{8}$
12	$335\frac{1}{2}$			
		4	$44\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{8}$
16	380			
		2	$23\frac{1}{5}$	$11\frac{2}{5}$
18	$403\frac{1}{5}$			
		2	$22\frac{1}{6}$	$11\frac{1}{12}$
20	425,5			
		4	45	$11\frac{1}{4}$
24	470,5			

Ces expériences, poussées jusqu'à vingt-quatre atmosphères, donnent une contraction uniforme et constante pour toutes les pressions intermédiaires. M. Œrsted avait reconnu cette constance pour les pressions moindres que six atmosphères. Nous avons découvert que cette uniformité de compression n'existe pas pour tous les liquides, et que quelques-uns d'entre eux donnent des degrés de contraction qui vont en diminuant, à mesure que la pression augmente.

La contraction moyenne observée est de $11\frac{1}{4}$ degrés sur l'échelle pour une pression de $0^m,7466$, le volume total du liquide équivalant à 237300 degrés. D'après ces données, on obtient pour la contraction apparente 48 millionièmes, et si l'on ajoute 1,65 millionièmes pour la contraction cubique du verre, on trouve que la *compression de l'eau à 0° = 49,65 millionièmes.*

Dans une autre expérience faite sur l'eau privée d'air avec un piézomètre différent, nous avions trouvé, toute correction faite, 49,5. Canton a donné trois mesures différentes de la compressibilité de l'eau : l'une à + 0°,5, l'autre à + 10°, et la troisième à 15°,2 centigrades. Les nombres qu'il donne étant corrigés de la contraction du verre et ramenés à 0^{m},76 sont 50 $\frac{1}{4}$, 47 $\frac{1}{5}$ et 46 millionièmes. Nos recherches ne confirment pas cette différence : nous avons trouvé que l'eau a la même compressibilité à 0° et à + 10°. Nous avons déjà fait observer les causes d'erreur qui ont dû altérer les résultats des expériences de Canton.

M. Œrsted a trouvé dans ses expériences le nombre 45 millionièmes, qui, corrigé pour la compression du verre, donne 46,65 millionièmes. Nous avons montré que dans l'appareil employé par ce physicien célèbre la mesure des pressions devait être trop faible, parce que l'air de son manomètre était en contact immédiat avec l'eau du récipient ; peut-être aussi l'eau employée par M. Œrsted n'avait-elle pas été privée de tout l'air qu'elle contenait.

EAU SATURÉE D'AIR A 0°.

A la température de 0° et sous la pression atmosphérique ordinaire, l'eau peut dissoudre environ un vingt-cinquième de son volume d'air dont la composition chimique n'est pas exactement la même que celle de l'air atmosphérique. Nous avons déterminé l'influence que cette quantité de gaz exerce sur la compressibilité de l'eau. Cette expérience était nécessaire pour comparer les mesures de la vitesse réelle du son dans l'eau douce avec la vitesse théorique que l'on déduit de sa densité et de sa compressibilité. Les résultats que nous avons obtenus indiquent que cet air modifie très sensiblement la compression de l'eau ; ils peuvent expliquer en partie la différence des nombres donnés par divers physiciens pour la compressibilité de ce liquide.

Nous donnons dans ce mémoire un tableau d'expériences faites sur l'eau saturée d'ammoniaque ; on y remarquera également une diminution très sensible de compressibilité.

Pour cette expérience, il était nécessaire d'introduire l'eau dans le piézomètre, sans avoir recours à l'ébullition de ce liquide, et même sans en élever sensiblement la température ; il fallait, d'un autre côté, éviter l'influence de la couche d'air qui aurait pu adhérer aux parois de l'instrument; nous y sommes parvenus en procédant de la manière suivante : les réservoirs de nos piézomètres étaient terminés (fig. 2, pl. I[re]) par une pointe ouverte en *i*, que l'on ne fermait que lorsque l'instrument était entièrement plein de liquide. Le tube capillaire étant aussi ouvert à son extrémité, il était facile de remplir complètement le piézomètre, sans élever la température du réservoir ; il suffisait pour cela de le plonger dans le liquide, et celui-ci entrait dans la boule *r* par la seule différence de niveau.

On introduisait d'abord une petite quantité d'eau dans le réservoir *r*, et on l'y faisait fortement bouillir ; on purgeait ainsi les parois intérieures de l'air adhérent, puis on remplissait entièrement le piézomètre par le procédé décrit sans élever la température du liquide. On fermait la pointe *i* au chalumeau, et s'il restait des bulles, la chaleur de la main suffisait pour les faire sortir.

EAU SATURÉE D'AIR A 0°.—VOLUME PRIMITIF = 237416 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°,25.

ATMOSPHÈRES de $0^m,7466$.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	$675\frac{1}{2}$			
		2	$22\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{4}$
3	653			
		1	$10\frac{3}{4}$	$10\frac{3}{4}$
4	$642\frac{1}{4}$			
		2	$20\frac{3}{4}$	$10\frac{3}{8}$
6	$621\frac{1}{2}$			
		2	$22\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{4}$
8	599			
		4	24	11
12	555			
		6	$65\frac{1}{2}$	10
18	$489\frac{1}{2}$			
		6	$66\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{12}$
24	423			

Ce tableau nous fournit la même observation que le précédent, c'est-à-dire que les contractions sont constantes pour des accroissements égaux de pression. Mais la valeur absolue de la compressibilité pour une atmosphère n'est plus la même qu'auparavant. Elle est moindre que pour de l'eau privée d'air, en sorte que l'eau qui contient de l'air en dissolution est moins compressible que celle qui en est privée. Nous avons aussi vérifié ce résultat à la température de $+ 4°$; les rapports de compressibilité ont été les mêmes. Cette diminution de compressibilité de l'eau qui contient de l'air en dissolution sert à confirmer ce que l'on savait déjà, c'est que cet air n'y est point contenu à l'état de simple mélange, mais qu'il y reste retenu par une véritable combinaison chimique.

Avant de terminer ce que nous avions à dire sur ce liquide, nous ferons observer que Canton ayant mesuré la compressibilité de l'eau non privée d'air, dit (*Transact. philosoph.* pour 1764) *que sa compressibilité est la même que celle de l'eau privée d'air ;* les faibles compressions qu'il employait ne lui auront sans doute pas permis d'apercevoir cette différence.

Les expériences précédentes ont été faites dans un piézomètre pour lequel le poids du volume de mercure remplissant le réservoir était de 271540 milligrammes ; le tube capillaire avait été divisé en quatre parties d'égales capacités, et le poids d'une colonne de mercure occupant ces quatre divisions était de 1578,5 milligrammes. Depuis le milieu de la première division, du côté du réservoir, jusqu'à la fin de la seconde, le tube était exactement cylindrique, et la longueur de cette deuxième division correspondait à 344 degrés sur l'échelle : le poids de la colonne de mercure occupant cette longueur était donc de $\frac{1578,5}{4} = 394,6$ milligrammes. En comparant ces poids, on trouve que le réservoir avait un volume équivalant à 236736 parties égales en capacité aux portions du tube capillaire longues d'un degré.

Le liquide, au commencement de l'expérience, remplissait le réservoir, plus une partie du tube capillaire égale à 680 degrés ; en les ajoutant au volume du réservoir que nous venons d'évaluer, on trouve pour le volume total primitif du liquide 237,416 des petits degrés du tube capillaire.

En comprimant le liquide, nous avons trouvé sa contraction moyenne pour chaque atmosphère égale à 11 degrés, ce qui fait $\frac{11}{237416}$ du volume primitif, ou à très peu près 46,2 millionièmes. Telle est la contraction observée pour chaque indication du manomètre ; il faut maintenant chercher la contraction pour une atmosphère de $0^m,76$ de mercure : pour cela, on corrige d'abord l'effet de la température, qui était de 10°,25 au lieu de 10°, ce qui augmentait de $\frac{1}{954}$ la valeur des indications, et l'on transforme les compressions de 0,7466 en atmosphères de 0,760. On obtient ainsi une contraction apparente de 47,65 millionièmes, qui, corrigée de l'influence de la compression du vase, devient égale *à 48,65 millionièmes, ainsi la présence de l'air diminue d'environ 1 millionième la compressibilité de l'eau* [1].

III

COMPRESSIBILITÉ DE L'ALCOOL

La seule mesure qui a été donnée pour la compressibilité de l'alcool est celle que Canton a insérée dans les *Transactions philosophiques :* à cette époque, on ne connaissait pas encore les procédés par lesquels on peut obtenir l'alcool anhydre, et l'on se contentait de distiller plusieurs fois ce liquide pour le purifier. Aussi le résultat publié par ce physicien pour de l'alcool dont la densité était 0,846 donne-t-il évidemment une contraction beaucoup trop faible et qui ne peut convenir qu'à un mélange d'eau et d'alcool. Le liquide que nous avons employé avait été purifié et

[1] Dans le mémoire imprimé dans les Annales de chimie et de physique, tome XXXVI, on remarque à la page 32 une erreur d'addition pour la somme des contractions du verre et du liquide ; cette somme est trop faible d'une unité.

distillé à plusieurs reprises sur du chlorure de calcium ; sa densité était 0,783 à 10°. On a eu soin pendant le temps employé à remplir le piézomètre de l'abriter du contact de l'air dont il aurait pu absorber l'humidité. Ce liquide est moins facile à observer que l'eau, parce qu'en se contractant il adhère quelquefois aux parois du tube capillaire, et que l'extrémité de la colonne sur laquelle on mesure les diminutions de volume abandonne quelquefois en cheminant de petites gouttes qui se fixent aux parois du tube. On corrige la petite erreur qui pourrait provenir de cette adhésion en observant la variation de volume sous des pressions successivement croissantes et décroissantes. L'alcool n'atteint pas immédiatement la valeur maximum de condensation à laquelle il doit arriver ; cet effet est surtout sensible quand on opère de fortes pressions. Nous avons eu soin, en conséquence, dans les expériences sur ce liquide, de faire durer chaque nouvelle pression pendant deux ou trois minutes, avant de mesurer la contraction qu'elle y produisait ; ce temps est nécessaire pour que la diminution de volume arrive à sa valeur finale. Le même phénomène s'observe pour l'éther sulfurique, le carbure de soufre et l'essence de térébenthine ; soit que cette anomalie provienne d'un arrangement particulier des molécules, qui ne serait complètement effectué qu'au bout d'un certain temps, soit qu'elle ait pour cause une légère élévation de température par l'effet de la compression.

Voici la plus régulière des trois séries d'expériences faites sur l'alcool :

ALCOOL A 11°6. — VOLUME PRIMITIF = 152660 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 7° $\frac{1}{2}$.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	202			
		2	27,7	13,85
3	235,7			
		3	39,8	13,2
6	275,5			
		6	80	13,6
12	355,5			
		6	78,5	13,2
18	434			
		6	77	12,8
24	511			
RETOUR				
24	511			
		6	76,5	12,8
18	434,5			
		6	78,5	13,1
12	356			
		6	79	13,19
6	277			
		3	41	13,6
3	436			
		2	27,5	13,75
1	208,5			

Les nombres de cette série, surtout ceux du retour qui sont réguliers, indiquent une diminution sensible de compressibilité pour des accroissements égaux de pression. On voit que les contractions les plus fortes sont aux contractions les plus faibles comme 138 : 128.

En réduisant ces mesures en millionièmes et en ramenant les indications du manomètre à la pression de $0^m,760$ et à 10° de température, on trouve, après avoir corrigé l'influence du verre, que la compressibilité spécifique de l'alcool anhydre varie avec la pression, et qu'elle est en moyenne de :

94,5 millionièmes de 1 à 2 atmosphères;
92,0 millionièmes de 9 à 10 atmosphères;
87,5 millionièmes de 21 à 22 atmosphères.

Canton a donné pour la contraction de l'alcool mélangé d'eau à la densité 0,846 un nombre qui, ramené à 0,76 et corrigé de la contraction du verre, donne 68,6 millionièmes. Il aurait été difficile d'en conclure, même approximativement, la compressibilité de l'alcool pur.

IV

COMPRESSIBILITÉ DE L'ÉTHER SULFURIQUE

La compression de ce liquide et celle des liquides suivants n'avait pas encore été mesurée; nous avons employé de l'éther préparé avec beaucoup de soin, et dont la densité à 11°,5 était 0,7245. L'observation des mouvements de la colonne capillaire présente pour ce liquide, comme pour l'alcool, quelques difficultés, parce qu'il adhère en petite quantité aux parois du tube, et surtout parce qu'il faut prolonger la pression pendant plusieurs minutes, pour qu'il ait le temps d'atteindre son véritable degré de contraction; c'est pour cela qu'on n'a opéré qu'à des intervalles de plusieurs atmosphères. On n'a noté les nombres indiqués dans la seconde colonne des tableaux qu'après s'être assuré par deux lectures faites à intervalles sur l'échelle, que la contraction était arrivée à son dernier terme. Les deux séries d'expériences contenues dans ce paragraphe ont été faites au moyen de deux piézomètres différents; elles indiquent un accroissement notable de compressibilité dans l'éther, quand la température s'est élevée de 0 à 11°,4. Cette différence est beaucoup plus marquée pour l'éther que pour la plupart des autres liquides.

Nous avons observé un fait singulier, en voulant purger l'éther de nos piézomètres de l'air qu'il contient : c'est qu'à chaque ébullition nouvelle, il se dégage des bulles de gaz, et ces bulles ne disparaissent pas, lors

même que le liquide est refroidi à 0°. Le temps nous a manqué pour vérifier la nature de ce gaz.

ÉTHER SULFURIQUE A 0°. — VOLUME PRIMITIF = 117930 DEGRÉS DU TUBE CAPILLAIRE. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°.

ATMOSPHÈRES de 0^m,7466.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS par atmosphère.
3	13			
		9	135	15
12	148			
		6	84	14
18	232			
		6	80	13 $\frac{2}{3}$
24	312			

La diminution de compressibilité est très sensible dans ce tableau, puisqu'elle varie dans le rapport de 15 à 13 $\frac{2}{3}$. Ces deux nombres réduits à la pression 0,76 de mercure à 10° donnent pour la contraction apparente 130 à 118 $\frac{1}{2}$ millionièmes, et en ajoutant à ces nombres la fraction 1,65 millionièmes, on a pour mesure de la compression réelle de l'éther à 0° :

De 3 à 12 atmosphères, 131,6 millionièmes;
De 18 à 24 atmosphères, 120 millionièmes à très peu près.

L'inconvénient que nous avons indiqué de l'adhésion d'une petite quantité de liquide aux parois du tube introduit quelque incertitude sur cette mesure, mais la plus grande erreur produite par cette cause ne dépasse pas 3 ou 4 millionièmes.

Les liquides deviennent plus compressibles quand leur température s'élève; cette différence est surtout très marquée pour l'éther sulfurique: c'est ce que montrent les résultats suivants, obtenus à la température de 11°,4.

ÉTHER SULFURIQUE A 11°,4. — VOLUME PRIMITIF = 198,170 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 9°.

ATMOSPHÈRES de 0^m,7466.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS par atmosphère.
1	658			
		2	59	29 $\frac{1}{2}$
3	599			
		3	86	28 $\frac{2}{3}$
6	513			
		6	169	28 $\frac{1}{6}$
12	344			
		6	164	27 $\frac{1}{5}$
18	180			
		6	162	27
24	18			

A trois atmosphères, la compression est égale à 28 $\frac{2}{3}$ degrés; de 20 à 24 atmosphères, elle n'est plus que de 27 degrés : en réduisant les pressions en atmosphères de 0^m,76 de mercure à 10°, et les degrés de contraction en millionièmes du volume primitif, on trouve que la compression apparente décroît de 146 à 138 millionièmes : ajoutant à ces deux nombres 1,65 pour le verre, on obtient pour limites de la compressibilité de l'éther à 11°,4 entre 2 et 24 atmosphères les nombres 148 à 140 millioniièmes à très peu près.

Ainsi, lorsque la température de l'éther sulfurique s'élève de 0° à 11°,4, sa compressibilité augmente à peu près dans le rapport de 12 à 14.

L'augmentation de compressibilité qui résulte de l'élévation de température a été signalée par Canton, qui l'avait observée pour l'huile d'olive et pour l'alcool mélangé d'eau.

V

COMPRESSIBILITÉ DE L'ACIDE SULFURIQUE LIQUIDE

Nous avons employé, pour cette détermination, de l'acide sulfurique hydraté très concentré : sa densité était à très peu près 1,848 à 15°. La résistance que ce liquide oppose à la compression est moindre que celle qu'on aurait dû lui supposer d'après sa densité et d'après les résultats obtenus sur d'autres liquides.

ACIDE SULFURIQUE CONCENTRÉ A 0°. — VOLUME PRIMITIF = 152655 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 8°,5.

ATMOSPHÈRES de 0m,7466.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	324			
		3	14	4 $\frac{2}{3}$
4	310			
		4	17	4 $\frac{1}{4}$
8	293			
		4	17	4 $\frac{1}{4}$
12	276			
		4	17	4 $\frac{1}{4}$
16	259			
	RETOUR			
16	259			
		4	17	4 $\frac{1}{4}$
12	276			
		4	16 $\frac{1}{2}$	4 $\frac{1}{8}$
8	292 $\frac{1}{2}$			
		4	17 $\frac{1}{2}$	4 $\frac{3}{8}$
4	310			
		3	13 $\frac{1}{2}$	4 $\frac{1}{2}$
1	323 $\frac{1}{2}$			

On peut adopter 4 $\frac{1}{4}$ pour valeur de la contraction moyenne pour une atmosphère de 0m,7466, l'air du manomètre étant à la température de

8° $\frac{1}{2}$. On déduit de là que la contraction doit être à très peu près égale à 4,37 degrés de l'échelle, pour une atmosphère de 0^m,76 de mercure, l'air du manomètre étant porté à la température de 10°.

Or le volume du réservoir du piézomètre, plus celui du liquide contenu dans le tube capillaire, comprend 152655 degrés de ce tube : ainsi, en divisant 4,37 par 152655, on aura la contraction de l'acide sulfurique à 0° égale à 28,6 millionièmes ; en lui ajoutant celle du verre 1,65, *on aura pour sa contraction réelle, 30,25 millionièmes.*

La dilatation de l'acide sulfurique de 0° à 100° est de 0,0588 ; son point d'ébullition étant à plus de 300°, sa dilatation entre ces limites 0 et 100 doit être assez uniforme. En la supposant toujours la même pour chaque accroissement de température d'un degré, la condensation de l'acide sulfurique pour un abaissement de température d'un degré sera 0,000588. *On voit qu'elle est équivalente à celle qui serait produite par une compression de 20 atmosphères.*

VI

COMPRESSIBILITÉ DE L'ACIDE NITRIQUE A 0°

L'acide nitrique sur lequel nous avons opéré était parfaitement pur, mais il n'était pas très concentré. Nous avons trouvé sa densité égale à 1,403 à 0°. Nous avons préféré le prendre à cette densité, pour éviter sa décomposition trop rapide par la lumière, et pour qu'il pût être conservé sans altération dans le piézomètre.

Un autre motif de ce choix, c'est que les expériences sur la dilatation et la chaleur spécifique de ce liquide ont été faites sur de l'acide ayant ce degré de densité. Pour empêcher qu'il ne pût absorber de l'humidité, nous avons introduit dans le tube capillaire une goutte de carbure de soufre, qui servait en même temps d'index.

ACIDE NITRIQUE A 0°. — DENSITÉ 1,403. — VOLUME PRIMITIF DU LIQUIDE = 214960 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 8 $\frac{1}{2}$.

ATMOSPHÈRES de 0^m,7446.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	607,5			
		3	20	6 $\frac{2}{3}$
4	587			
		4	27	6 $\frac{3}{4}$
8	560			
		4	27	6 $\frac{3}{4}$
12	533			
		4	27	6 $\frac{3}{4}$
16	506			
		16	109	6 $\frac{15}{16}$
32	397			
RETOUR				
32	397			
		16	108 $\frac{1}{2}$	6 $\frac{3}{4}$
16	505 $\frac{1}{2}$			
		4	26	6 $\frac{3}{4}$
12	532 $\frac{1}{2}$			
		4	27 $\frac{1}{2}$	6 $\frac{5}{8}$
8	559			
		4	27	6 $\frac{3}{4}$
4	586			
4	588			
		12	81	6 $\frac{3}{4}$
16	507			

La contraction moyenne est à très peu près égale à 6,75 degrés du tube capillaire, ce qui fait 32,2 millionièmes pour la contraction apparente sous la pression d'une colonne de mercure de 0^m,760 à 10° : ajoutant à ce nombre la contraction de l'enveloppe, *on trouve la compressibilité spécifique de l'acide nitrique (dont la densité est 1,403) = 33,85 millionièmes.*

VII

COMPRESSIBILITÉ DE L'EAU QUI CONTIENT DU GAZ AMMONIAC

Jusqu'ici nous avons vu la compressibilité s'accroître à mesure que la densité diminue, et cette loi se vérifie pour les six liquides, dont nous avons donné les tableaux de compressibilité. L'eau saturée de gaz ammoniac présente sous ce rapport une anomalie remarquable; cette solution a une densité moindre que celle de l'eau pure, et à 10° centigrades la densité de ce liquide saturé de gaz n'est que 0,9. C'est à cette densité que nous avons pris la solution dont nous avons rempli un piézomètre, en employant le procédé déjà décrit en détail à l'occasion des expériences sur l'eau saturée d'air [1].

L'inspection des deux tableaux suivants nous donne, pour la compressibilité de cette solution, un nombre beaucoup plus faible que pour l'eau pure, et très peu différent de celui qui représente la compressibilité de l'acide nitrique.

[1] V. page 31.

EAU ET GAZ AMMONIAC A 10° C. — VOLUME PRIMITIF DU LIQUIDE = 389360 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	580			
		3	46	15 $\frac{1}{3}$
4	534			
		4	53	13 $\frac{1}{4}$
8	481			
		2 $\frac{3}{4}$	38	13 $\frac{3}{4}$
10 $\frac{3}{4}$	443			
		5 $\frac{1}{4}$	68	13
16	375			
		RETOUR		
16	378			
		5 $\frac{1}{4}$	65 $\frac{1}{2}$	12 $\frac{1}{2}$
10 $\frac{3}{4}$	443 $\frac{1}{2}$			
		2 $\frac{3}{4}$	37 $\frac{1}{2}$	13 $\frac{1}{2}$
8	481			
		4	52	13
4	533			
		3	46	15 $\frac{1}{3}$
1	579			

BIS

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
4	534			
		4	53	13 $\frac{1}{4}$
8	481			
		2 $\frac{3}{4}$	37	13
10 $\frac{3}{4}$	444			
		5 $\frac{1}{4}$	66	12 $\frac{1}{2}$
16	378			

Ces deux tableaux nous offrent une diminution très marquée de compressibilité à mesure que la pression augmente; l'accord de ces deux séries ne permet pas de soupçonner une erreur d'observation; le piézomètre employé à cette expérience avait un tube capillaire parfaitement cylindrique dans toute la longueur occupée par l'échelle; ce liquide est

d'ailleurs facile à observer, parce qu'il ne se divise pas dans la colonne capillaire comme l'éther sulfurique, le carbure de soufre, etc.

En admettant 13 $\frac{1}{4}$ pour la contraction moyenne produite par les premières atmosphères, on trouve que la contraction est égale à 34 millioniémes pour une atmosphère de $0^m,76$ de mercure à 10°, *ce qui donne, en ajoutant la contraction du verre, 36 $\frac{1}{3}$ millioniémes pour la contraction vraie. La vitesse de transmission du son dans ce liquide serait, d'après ces nombres, de 1765 mètres par seconde.*

VIII

COMPRESSIBILITÉ DE L'ÉTHER NITRIQUE A 0°

La dilatation des liquides étant en général plus grande et variable lorsqu'ils approchent de leur point d'ébullition, nous aurions supposé que la contraction de l'éther nitrique, dont le point d'ébullition est à 21°, aurait offert des différences sensibles pour diverses pressions. Cependant le tableau suivant ne donne qu'une diminution assez faible de compressibilité.

VOLUME PRIMITIF = 197740 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°.

ATMOSPHÈRES de $0^m,7466$.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	444 $\frac{1}{2}$			
		5	99 $\frac{1}{2}$	13 $\frac{9}{10}$
6	375			
		6	80 $\frac{1}{4}$	13 $\frac{1}{2}$
12	293 $\frac{3}{4}$			
		6	81 $\frac{1}{4}$	13 $\frac{1}{2}$
6	372 $\frac{1}{4}$			
		12	162	13 $\frac{1}{2}$
18	213			
		6	80	13 $\frac{2}{3}$
24	133			

La contraction moyenne est 13,5, d'où résulte 13,74 pour une atmosphère de $0^m,76$, ce qui fait 68,2 millionièmes pour une atmosphère à 10° de $0^m,76$ de mercure. *La contraction réelle, en tenant compte de la compressibilité du verre, est égale à 69,* $\frac{3}{4}$ *millionièmes.*

IX

ÉTHER ACÉTIQUE A 0°. — VOLUME PRIMITIF = 233,900 DEGRÉS DU TUBE CAPILLAIRE. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE 12°.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES d'atmosphère	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	520			
4	468	3	52	17 $\frac{1}{3}$
8	401	4	67	16 $\frac{3}{4}$
0 $\frac{2}{3}$	353 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{2}{3}$	47 $\frac{1}{2}$	17 $\frac{3}{4}$
16	272	5 $\frac{1}{3}$	81 $\frac{1}{2}$	15 $\frac{1}{4}$
		RETOUR		
16	272			
8	399	8	127	15 $\frac{7}{8}$
4	468	4	69	17 $\frac{1}{4}$
1	520	3	53	17 $\frac{1}{3}$
		BIS		
4	468			
8	398	4	70	17 $\frac{1}{2}$
16	270	8	128	16

Quoique les nombres qui expriment les contractions de l'éther acétique à des degrés variables de pression présentent quelques différences, cependant on voit que ces erreurs se corrigent mutuellement, et l'inspection

des résultats comparés à de fortes et faibles pressions indique une diminution sensible de compressibilité à peu près dans le rapport de 17 à 15,7.

Les contractions réduites à une atmosphère à 10° de 0^m,76 de mercure varient de 76 à 68 millionièmes. En y ajoutant celle du verre 1,65, on aura les contractions réelles 77 $^2/_3$ et 69 $^2/_3$ millionièmes.

X

ÉTHER HYDRO-CHLORIQUE A 11°,2. — VOLUME PRIMITIF = 255,340 DEGRÉS. — THERMOMÈTRE DU MANOMÈTRE A 8°.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	383			
3	341	2	42	21
6	280	3	61	20 $\frac{1}{3}$
12	159,5	6	120,5	20 $\frac{1}{12}$
		RETOUR		
6	280			
3	340,5	3	60,5	20 $\frac{1}{6}$
1	383	2	22,5	21 $\frac{1}{4}$

On sait que l'éther hydro-chlorique bout à 12°. Il nous a paru intéressant de mesurer la contraction que subit ce liquide lorsque sa température est très rapprochée de son point d'ébullition.

De 1 à 3 atmosphères la contraction est de 82,6 millionièmes;

De 6 à 12 atmosphères la contraction moyenne est de 78,95 millionièmes.

En ajoutant la contraction du verre, on aura la contraction réelle du liquide 84 $^1/_3$ et 80 $^2/_3$ millionièmes.

XI

ACIDE ACÉTIQUE A 0°. — VOLUME PRIMITIF = 239,060 DEGRÉS. — THERMOMÈTRE DU MANOMÈTRE A 9°,7.

ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS de l'échelle.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
4	252	
8	289	9 $\frac{1}{4}$
10 $\frac{2}{3}$	315	9 $\frac{3}{4}$
16	363	9
	RETOUR	
16	364	
10 $\frac{2}{3}$	316	9
8	291	9 $\frac{5}{8}$
4	254	9 $\frac{1}{4}$

Si l'on prend 9 $^1/_4$ pour la contraction moyenne du liquide, on aura la contraction pour une atmosphère de $0^m,76$ de mercure à 10°, égale à 39 millionièmes, et, *ajoutant la correction du verre, on aura la compressibilité absolue à zéro = 40 $\frac{2}{3}$ millionièmes.*

Nous avons pensé que les résultats des quatre tableaux précédents méritaient d'être ajoutés à ceux obtenus pour les autres liquides, quoique la composition des corps auxquels ils se rapportent ne soit pas encore déterminée avec la même précision que celle des liquides qui les précèdent[1]. Ces tableaux donneront une notion suffisamment exacte de la

[1] Ces quatre liquides avaient été préparés par M. Robiquet; ce chimiste a eu la complaisance, sur la demande de M. Dumas et d'après nos propres instances, de faire préparer avec soin quelques échantillons de ces corps pour nos expériences de compression.

compressibilité de ces liquides, jusqu'à l'époque où la chimie aura fourni de bons procédés pour la vérification de leur parfaite identité.

XII

EAU DE MER

Nous nous sommes procuré de l'eau de mer puisée dans la Manche entre le Havre et la côte d'Angleterre ; nous avons trouvé que la densité de cette eau, prise au mois de décembre 1826, près de la surface, était égale à 1,022 à 10°. La compressibilité de cette eau a été déterminée par les expériences suivantes.

EAU DE MER A 12°,4. — VOLUME PRIMITIF = 154,200 DEGRÉS. — TEMPÉRATURE DU MANOMÈTRE = 10°.

ATMOSPHÈRES de 0^m,7466.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTION pour une atmosphère.
1	29			
3	41 $\frac{1}{3}$	2	12 $\frac{1}{3}$	6 $\frac{1}{6}$
6	60 $\frac{1}{2}$	3	19 $\frac{1}{6}$	6 $\frac{1}{5}$
18	134	12	73 $\frac{1}{2}$	6 $\frac{1}{8}$
24	170 $\frac{3}{4}$	6	36 $\frac{1}{4}$	6 $\frac{1}{8}$
18	134	6	36 $\frac{3}{4}$	6 $\frac{1}{8}$
6	60 $\frac{1}{2}$	12	73 $\frac{1}{2}$	6 $\frac{1}{8}$
1	29 $\frac{1}{2}$	5	31	6 $\frac{1}{5}$

La contraction moyenne est de 6,14 degrés; elle serait de 6,25 pour

une atmosphère de $0^m,76$. On trouve que la contraction apparente est égale à 40,5, il faut ajouter 1,65 pour la compressibilité du verre, *ce qui donne pour la contraction réelle de cette eau 42,15 millionièmes.*

On sait d'ailleurs que la densité de l'eau de la mer varie dans les différents lieux et même selon la profondeur à laquelle elle a été puisée; ainsi ce nombre ne peut être considéré que comme une mesure particulière, puisque de très petites quantités de matières étrangères dissoutes dans l'eau peuvent modifier notablement sa compressibilité.

XIII

CARBURE DE SOUFRE

D'après plusieurs expériences, la compressibilité du carbure de soufre = 78 millionièmes environ à 0° pour une atmosphère.

Cependant nous ne donnons ce nombre que comme une approximation. Nous avons mesuré à diverses reprises la compressibilité de ce liquide, et ces différentes mesures nous ont offert quelques anomalies, qui ne nous permettent pas de fixer encore d'une manière précise la compressibilité spécifique de ce liquide. Son adhésion aux parois du verre, et peut-être des altérations chimiques qu'il éprouve, occasionnent ces irrégularités.

XIV

ESSENCE DE TÉRÉBENTHINE

Les expériences sur ce liquide ne sont pas susceptibles d'une très grande précision, parce qu'il adhère aux parois du tube par sa viscosité,

et n'arrive pas immédiatement au point que son extrémité doit atteindre. Nous avons réussi à neutraliser sensiblement cet effet, en fixant pendant très longtemps le manomètre à 16, 18 et 24 atmosphères, jusqu'à ce que l'extrémité de la colonne demeurât parfaitement immobile.

ESSENCE DE TÉRÉBENTHINE À 0°. — VOLUME PRIMITIF = 255,340 DEGRÉS. — THERMOMÈTRE DU MANOMÈTRE A 8°.

ATMOSPHÈRES de $0^m,7466$.	DEGRÉS de l'échelle.	DIFFÉRENCES de pression.	DIFFÉRENCES de contraction.	CONTRACTIONS pour une atmosphère.
1	703			
4	640	3	63	21
8	570	4	70	$17\frac{1}{2}$
12	503	4	68	17
16	432	4	70	$17\frac{1}{2}$
		RETOUR		
16	432			
12	502	3	70	$17\frac{1}{2}$
8	571	4	69	$17\frac{1}{4}$
4	641	4	70	$17\frac{1}{2}$
1	704	4	63	21

En adoptant 17,33 pour contraction moyenne, on trouve 69,7 millioniémes pour la pression normale d'une atmosphère à 10° de $0^m,76$ de mercure. *La contraction réelle, en tenant compte de la compressibilité du verre, est par conséquent = 71,35 millioniémes.*

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDES ACCESSOIRES

---

§ I

CHALEUR DÉGAGÉE PAR LA COMPRESSION DES LIQUIDES

Les élévations de température qui résultent de la compression des corps ont attiré depuis quelques années l'attention de plusieurs géomètres et physiciens. La connaissance de ces phénomènes se lie aux questions les plus importantes de la physique, et pourrait conduire à des conséquences d'un haut intérêt.

Ces recherches ont encore acquis une nouvelle importance pour les géomètres depuis que M. Laplace en a montré l'application à la théorie du son, et a prouvé qu'en tenant compte de la chaleur dégagée dans la compression de l'air on fait coïncider la formule mathématique de la vitesse du son dans l'air avec les résultats fournis par l'expérience.

Les phénomènes du dégagement de la chaleur par la compression des gaz nous sont presque entièrement connus, grâce aux travaux de M. Gay-Lussac, de M. Clément Desormes et aux recherches plus récentes de MM. de la Rive et Marcet.

On doit à MM. Berthollet et Pictet des observations sur l'élévation de

température qui résulte de la compression des métaux dans le frappé des médailles; Rumfort et M. Morosi ont fait des recherches sur la chaleur dégagée par le frottement des métaux; mais, vu l'extrême difficulté de ce genre d'expériences, il est peu probable que l'on parvienne à des résultats bien précis.

Quant au dégagement de chaleur qui semble devoir accompagner la compression des liquides, il n'a point encore été reconnu d'une manière directe; les seules expériences qui aient été faites jusqu'ici sur ce sujet sont celles de M. Desaigne et celle que M. Œrsted a consignée dans son mémoire sur la compressibilité de l'eau.

Le premier a annoncé, dans une note insérée dans le Bulletin de la Société philomatique, qu'il est parvenu à dégager de la lumière de plusieurs liquides, en les soumettant à une compression forte et subite. M. Œrsted dit (*Annales de chimie et de physique*, tome XXII) avoir essayé vainement de produire de la chaleur par une compression de l'eau égale à 6 atmosphères. Il était douteux, d'après son expérience, que l'on pût parvenir à mesurer avec exactitude le dégagement de chaleur que doit produire la compression des liquides. Il fallait même, pour pouvoir espérer de la rendre sensible, employer un appareil où l'on pût reconnaître de très faibles degrés de chaleur, et qui fût capable en même temps de résister à des pressions et à des chocs considérables.

La disposition que nous avons adoptée nous paraît satisfaire à la fois à ces deux conditions. Elle consiste (planche II, figure 3) en un ballon de verre B, dont la capacité intérieure est d'environ $\frac{3}{4}$ de litre, et dont les parois, épaisses de 25 à 35 millimètres, peuvent supporter des compressions rapides d'un grand nombre d'atmosphères. Au centre de ce ballon est suspendue la spirale *t* d'un thermomètre métallique de Bréguet; une portion de cadran *a*, placée au-dessous, sert à mesurer les déviations de l'aiguille. Ce thermomètre se trouve ainsi plongé dans une masse suffisante de liquide, et il est impossible que la température de celui-ci puisse varier sans qu'on n'en soit averti à l'instant même.

La résistance du liquide rend l'observation de l'indication ce thermo-

mètre beaucoup plus facile qu'elle ne l'est dans les gaz, où les oscillations de l'aiguille sont difficiles à observer.

Le ballon ayant été rempli avec DE L'EAU DISTILLÉE, PRIVÉE D'AIR PAR L'ÉBULLITION, nous l'avons vissé à une pompe de compression fixée solidement à un étau. Pour connaître d'abord l'effet d'une compression lente sur la température du liquide, nous nous sommes servis d'un tour à vis sans fin F, adapté au cylindre de la pompe. En comprimant l'eau du ballon jusqu'à 36 atmosphères, nous avons observé une déviation de l'aiguille du thermomètre, mais en sens contraire de celle qu'aurait produite un accroissement de température. Cette déviation était d'environ un degré de la division du thermomètre pour 12 atmosphères. Elle s'explique très bien par l'inégale compressibilité des deux métaux qui le composent. N'ayant pas d'expérience précise sur la mesure de la compressibilité du platine, nous ne pouvons décider si la déviation rétrograde était exactement ce qu'elle devait être d'après l'inégale compressibilité de ce métal et de l'argent, ou si elle était diminuée par un très petit accroissement de température.

Si on considère que pour le plus grand nombre des métaux, une différence de pression d'au moins 15 atmosphères ne produit qu'une contraction qui équivaut tout au plus au changement de volume produit par un abaissement de température d'un seul degré, *on en pourra conclure avec certitude que pour l'eau une compression lente de 36 atmosphères ne produit pas un changement de température d'un seul degré.*

Pensant que la rapidité de la compression pouvait avoir quelque influence, nous avons supprimé la vis sans fin du tour, et nous nous sommes servis d'un levier L pour opérer cette compression. Par ce moyen, nous pouvions produire une pression de 30 atmosphères en moins d'un quart de seconde. Les déviations de l'aiguille ont été exactement les mêmes et dans le même sens que pour une compression plus lente. Cependant, comme cette compression ne pouvait pas être considérée comme instantanée, nous avons fait des expériences semblables en faisant frapper sur le piston à coups de marteau. Indépendamment des légères

oscillations imprimées à l'aiguille du thermomètre par l'action du choc, *nous avons encore observé une déviation constante et négative,* quoique les coups de marteau eussent été assez forts pour refouler le métal à l'extrémité de la tige du piston.

En répétant ces expériences sur L'ALCOOL, nous avons obtenu des résultats semblables ; seulement, la déviation nous a paru moindre, et même les coups de marteau paraissaient occasionner une légère déviation en plus sur le thermomètre.

L'ÉTHER SULFURIQUE était le liquide le plus propre à rendre sensible un dégagement de chaleur, puisque sa compressibilité est presque triple de celle de l'eau. En conséquence, nous avons remplacé l'alcool par de l'éther à 64 degrés.

Les compressions lentes de 30 et 36 atmosphères n'ont eu presque aucune influence sur le thermomètre ; l'aiguille a paru presque stationnaire, et la contraction de l'hélice a été sensiblement nulle, ce qui indiquait que la chaleur dégagée devait être de 1 à 2 degrés. Mais lorsque nous avons substitué à ces moyens de compression le choc des coups de marteau, l'aiguille a indiqué une élévation moyenne de température d'environ 3 ou 4 degrés du thermomètre.

Nous avions déjà reconnu cette élévation de température dans des expériences précédentes, faites avec des pressions subites de 40 atmosphères, au moyen du même ballon auquel était adapté un récipient plein d'air comprimé S (figure 4), muni d'un manomètre m et d'un robinet R, pour obtenir subitement la communication ; les résultats que nous avions obtenus n'avaient pas différé beaucoup de ceux qu'ont produits les coups de marteau. Ce moyen a l'avantage d'occasionner une pression parfaitement déterminée, et qui ne varie point pendant l'expérience ; cependant, comme il est difficile de comprimer l'air à de si hautes pressions, et que l'effort nécessaire pour ouvrir subitement le robinet agitait l'aiguille presque autant que les coups de marteau, nous avons employé préférablement la pompe de compression. Si l'on essaie des expériences analogues, en remplaçant le thermomètre Breguet par de petits thermomètres

à mercure très sensibles, ouverts à leur extrémité supérieure, on observe presque constamment une élévation de la colonne capillaire, qui paraît indiquer des accroissements sensibles de température ; mais nous avons reconnu que cette élévation provient de l'inégale compression que supporte la boule au dedans et au dehors, parce que le frottement de la colonne de mercure dans le tube capillaire empêche la compression de se transmettre instantanément au liquide que contient la boule du thermomètre.

Il nous paraît démontré par ces expériences : 1° *que la température de l'eau ne s'élève pas sensiblement par une compression subite de 40 atmosphères;* 2° *que, pour l'alcool et l'éther sulfurique, une compression de 36 et 40 atmosphères, opérée dans plus d'un quart de seconde, n'élève pas leur température de plus d'un ou deux degrés centigrades; mais qu'une compression plus puissante, telle que celle que peut produire un coup de marteau, opérée sur l'éther sulfurique, dégage assez de chaleur pour élever sa température d'environ trois ou quatre degrés centigrades.*

Nous donnerons à la fin de ce Mémoire une nouvelle preuve du peu de chaleur dégagée dans une compression rapide de l'eau, déduite de la comparaison de la vitesse du son, observée dans ce liquide, avec celle que donne la formule de MM. Laplace et Poisson, indépendamment de toute élévation de température. Cette comparaison nous offrira une vérification précieuse des expériences comprises dans cet article.

Il est sans doute difficile de concilier en théorie ces résultats de nos observations avec les expériences de M. Desaigne ; mais rien n'autorise à affirmer que la lumière, que ce physicien dit avoir observée dans ces liquides par des compressions très puissantes, soit l'indice d'une haute élévation de température. Il faut ranger ce phénomène dans la même classe que celui du dégagement de lumière produit par la compression de quelques corps solides, des quartz, par exemple, qui, lorsqu'on les choque dans l'obscurité, paraissent lumineux, sans que pour cela leur température s'élève sensiblement, lors même qu'on réitère plusieurs fois ces chocs.

---

§ II.

RECHERCHES SUR L'INFLUENCE DE LA COMPRESSION SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE

Pour ces recherches (voyez planche II, figure 5), nous avons pris des tubes de verre *a b*, longs d'environ 3 décimètres, fermés aux deux bouts; aux extrémités *a* et *b* étaient soudés à la lampe des fils de platine communiquant à l'intérieur, et destinés à y faire passer le courant. La compression se transmettait au liquide contenu dans ce tube par le moyen d'un second tube *d*, soudé au milieu du premier et perpendiculairement à sa longueur, de manière à former une figure semblable à celle d'un *T*. C'est au moyen de ce second tube qu'on remplissait l'appareil du liquide. On l'adaptait ensuite à une pompe de compression C D, munie d'un manomètre *m m*.

Au moyen de cet appareil, le liquide qui transmettait le courant pouvait être comprimé sans qu'aucune cause, autre que la compression, pût influer sur sa conductibilité.

Pour avoir un courant d'une intensité sensiblement constante pendant le temps nécessaire pour une expérience, nous avons employé une pile à auges P, chargée avec de l'eau pure ou légèrement salée. Une des extrémités correspondait à un galvanomètre *g* à deux aiguilles, dont le fil se trouvait compris dans le circuit. On réglait d'abord la pile de manière qu'en complétant le circuit avec le liquide introduit dans le tube, la déviation du galvanomètre fût au moins de 15 degrés plus faible que celle qu'on obtenait en le complétant avec du mercure. On était donc sûr que cette diminution de 15 degrés était due à l'imparfaite conductibilité du liquide soumis à l'expérience, et qu'elle était suffisante pour que l'on pût apprécier de très petites différences de conductibilité. En effet, nous nous servions d'un galvanomètre dont l'aiguille supérieure portait un fil de verre très fin qui mesurait les dévia-

tions sur un arc de cercle de trois pouces de rayon, et donnait très facilement des quarts de degrés.

Un de nos appareils ayant été rempli d'eau distillée, on y fit passer un courant qui fit dévier l'aiguille de 22 degrés. En supprimant cette colonne d'eau intermédiaire, et la remplaçant par du mercure, la déviation s'éleva à 76°. Dans ce cas, la différence de déviation due au peu de conductibilité de l'eau était de 54°.

Voici le tableau des déviations observées pour des pressions de 5, 10, 20, 30 atmosphères :

	ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS DE DÉVIATION.
EAU PURE.	1	22 $\frac{3}{4}$
	5	22 $\frac{3}{4}$
	10	22 $\frac{1}{4}$
	20	23
	30	23

On voit par ce tableau que le rapprochement des molécules de l'eau, dû à la compression de liquide, n'a pas une influence bien sensible sur sa conductibilité. La différence de déviation d'un quart de degré est trop petite pour qu'on puisse en conclure avec certitude une variation de conductibilité. Ce résultat mérite d'autant plus d'être remarqué, que ces 30 atmosphères produisent une contraction équivalente à celle que produirait un abaissement de température de 3 degrés, et qu'une telle diminution de chaleur fait varier sensiblement la conductibilité de l'eau.

Une expérience semblable, faite avec une dissolution concentrée d'ammoniaque, a donné le même résultat, c'est-à-dire que la déviation

du galvanomètre était sensiblement la même lorsque le courant traversait ce liquide comprimé ou non comprimé.

En faisant passer le courant au travers d'une longue colonne de mercure contenue dans un tube capillaire, nous n'avons pu également obtenir aucune variation de conductibilité. Il n'en a pas été de même pour l'acide nitrique. Nous avons trouvé, en le comprimant, que la déviation de l'aiguille diminue d'une quantité notable, comme le montrent les résultats suivants déduits de trois expériences.

	ATMOSPHÈRES.	DEGRÉS DE DÉVIATION.
ACIDE NITRIQUE.	1	47
	5	47
	10	46 $\frac{3}{4}$
	20	46
	30	44 $\frac{3}{4}$

Lorsqu'on supprimait la colonne d'acide nitrique, et qu'on la remplaçait par une goutte de mercure, la déviation s'élevait à 63°. La différence de 16° provenait par conséquent de la conductibilité imparfaite de l'acide nitrique. La diminution de conductibilité dans cet acide, lorsqu'il est soumis à de fortes pressions, ne nous paraît pas provenir de l'obstacle que pourrait opposer au passage de l'électricité le rapprochement de ses particules, puisque, dans les liquides plus compressibles, tels que l'eau pure et l'eau saturée d'ammoniaque, ce rapprochement n'influe pas sur la conductibilité. Il nous semble que ce phénomène doit être attribué à une autre cause, c'est-à-dire au changement que l'accroissement de pression produit dans la force d'affinité des éléments du liquide.

On ne peut expliquer plusieurs phénomènes de conductibilité dans les corps liquides, par exemple, le peu d'intensité d'un courant qui passe à

travers de l'eau pure, et l'accroissement considérable de cette intensité par l'addition d'une très petite quantité d'un acide, d'une base ou d'un sel soluble, qu'en admettant, avec plusieurs chimistes et physiciens célèbres, que cette transmission du courant s'opère par une suite de compositions et de décompositions successives. Il y a, sans doute, dans tous les cas, une portion de l'électricité qui est transmise par le corps liquide, indépendamment de toute action chimique. Ainsi, dans le mercure, on ne peut soupçonner aucune composition et décomposition possible. L'eau parfaitement pure conduit l'électricité à haute tension, sans aucune séparation de ses éléments. Mais, pour des liquides non métalliques, et lorsque la force électro-motrice qui produit le courant n'a qu'une faible tension, la plus grande partie de l'électricité se transmet à travers le liquide par le transport des molécules électro-positives et électro-négatives. La facilité de décomposition doit alors influer d'une manière puissante sur l'intensité du courant, et cette intensité diminuera si une nouvelle cause vient mettre obstacle à la séparation des éléments. Il nous paraît probable que c'est à cette cause que tient la diminution que nous avons observée dans la déviation du galvanomètre, lorsque l'acide nitrique, qui transmettait l'électricité, était soumis à de fortes pressions. En effet, il a été bien établi, par les recherches de M. Hall et plusieurs autres qui ont été faites depuis, qu'une forte pression diminue ou empêche la décomposition d'un grand nombre de substances, surtout lorsqu'elles contiennent des éléments gazeux. Il est donc possible que la décomposition rapide de l'acide nitrique par le courant de la pile ait été ralentie par la compression, et qu'il en soit résulté une diminution dans l'intensité du courant. Si telle est réellement la cause de cette diminution de conductibilité dans l'acide nitrique comprimé, il est probable que le même phénomène a lieu pour l'eau distillée ou chargée d'ammoniaque, mais que, vu son peu de conductibilité, la différence ne peut être mesurée.

De l'observation générale des principaux faits mentionnés dans cet article nous croyons pouvoir conclure qu'une pression de 30 atmosphères ne change pas d'une manière sensible la conductibilité électrique du

mercure d'une solution concentrée d'ammoniaque et de l'eau distillée; qu'elle produit une diminution dans la conductibilité de l'acide nitrique, et que cet effet peut s'expliquer par l'obstacle que la pression oppose à sa décomposition.

TROISIÈME PARTIE

TRANSMISSION DU SON DANS L'EAU

---

§ I.

VITESSE DU SON DANS LES LIQUIDES

On sait depuis longtemps que le son se transmet à travers les corps solides et liquides, comme dans l'air et dans les fluides aériformes. La connaissance du degré de compressibilité de l'eau ou de tout autre liquide donne le moyen de déterminer la vitesse avec laquelle le son doit s'y propager. MM. Young et Laplace ont signalé cette application importante. Ils ont donné la formule à l'aide de laquelle, connaissant le degré de contraction qu'éprouve un liquide pour un accroissement donné de pression, on peut calculer la vitesse de la propagation du son dans une masse indéfinie de ce liquide. On calcule également par la même formule la vitesse du son dans les corps solides, pourvu que l'on connaisse la contraction qu'éprouve leur volume pour une pression donnée. M. Poisson a traité cette question dans un savant mémoire qui fait partie de ceux de l'Institut pour 1819 (pages 396-400). On y trouve la démonstration développée de la formule dont il s'agit.

La théorie étant aussi complète qu'elle peut l'être, il ne restait plus

qu'à la comparer avec l'expérience, soit afin de vérifier l'une par l'autre, soit afin de découvrir la différence qui pouvait exister entre elles. Nous avons donc entrepris une suite d'expériences sur la vitesse du son dans l'eau, seul liquide où de telles expériences soient possibles, dans le dessein de comparer la vitesse observée avec la formule théorique qui doit la représenter.

On verra plus loin le détail de nos moyens d'expériences et de nos résultats; mais avant de les exposer, il nous paraît convenable de rappeler sommairement les points principaux de la théorie du son, et particulièrement la formule qui sert à calculer sa vitesse dans les substances liquides ou solides.

Newton est, comme on sait, le premier qui ait recherché les lois de la propagation du son dans l'atmosphère. Il considère une ligne indéfinie de molécules d'air, et suppose qu'une portion de petite étendue de cette ligne d'air soit primitivement ébranlée; il montre que cet ébranlement se propage de proche en proche dans toutes les tranches de la colonne d'air, comme on voit se faire la communication du mouvement dans une série de billes élastiques, et il détermine le temps que cet ébranlement, qui produit la sensation du son, emploie à parvenir à une distance quelconque de son origine. Il trouve que la propagation du son est uniforme, que la vitesse de cette propagation supposée horizontale, ou l'espace que le son parcourt dans chaque seconde sexagésimale, a pour valeur la racine carrée du double produit de la hauteur dont la pesanteur fait tomber les corps dans la première seconde, par la hauteur d'une colonne d'air qui ferait équilibre à la colonne de mercure du baromètre, et qui aurait partout la même densité qu'au bas de la colonne.

Lagrange, Euler, Laplace et M. Poisson ont ensuite déduit cette même expression de la vitesse du son des équations analytiques aux différences partielles qui représentent le mouvement de l'air, soit dans une colonne cylindrique d'une longueur indéfinie, soit dans une masse d'air illimitée.

En étendant leurs recherches au cas où le mouvement de l'air se fait

suivant deux ou trois dimensions, ils ont trouvé que, quoique l'intensité du son décroisse alors avec la distance, sa vitesse est la même que dans le cas où ce mouvement n'a lieu que suivant une seule dimension. Il résulte de cette théorie que chaque vibration d'une particule d'air produit dans la masse une onde sonore de figure sphérique, d'une épaisseur très petite, qui se compose de toutes les molécules d'air en mouvement dans un instant donné, et qui s'éloigne indéfiniment du centre d'ébranlement. Le rayon de cette onde croît proportionnellement au temps écoulé, et c'est son accroissement constant dans l'unité de temps qui mesure la vitesse de propagation du son.

Il existait cependant une différence notable entre la vitesse du son dans l'air déduite de cette théorie et celle qui résulte des expériences. Les physiciens, en très grand nombre, qui ont mesuré directement cette vitesse, se sont accordés à la trouver plus grande que la vitesse calculée, tellement que la différence s'élève à $^1/_6$ de la valeur observée.

Il serait inutile de rappeler toutes les hypothèses qui ont été faites pour concilier sur ce point le calcul et l'observation.

On doit à M. Laplace la véritable explication de cette différence. Elle doit être attribuée à l'accroissement d'élasticité des molécules d'air produit par le dégagement de chaleur qui accompagne leur compression. En y ayant égard, on détermine la quantité de chaleur rendue sensible dans la production du son employée à augmenter l'élasticité de l'air. M. Poisson a fait voir que si la compression ou la dilatation est de $\frac{1}{116}$, la température doit s'élever ou s'abaisser d'un degré centésimal. Enfin M. Laplace est parvenu à un théorème qui ne laisse plus rien à désirer sur la certitude de son explication. Il a trouvé que la vitesse du son est égale au produit de la valeur que donne la formule de Newton, multipliée par la racine carrée du rapport de la chaleur spécifique de l'air sous une pression constante, à sa chaleur spécifique sous un volume constant. Ce rapport est un nombre plus grand que l'unité. Pour le déterminer, M. Laplace a fait usage des expériences de MM. Gay-Lussac et Welter. La formule de Newton ainsi modifiée s'est trouvée à peu près d'accord avec la vitesse réelle donnée par l'observation.

Le calcul de la vitesse du son et les lois de sa transmission dans les liquides et les solides sont presque les mêmes que dans l'air. Il suffit pour notre objet de rapporter ici la formule qui représente la vitesse du son dans un liquide.

Soit D la densité d'un liquide, K la longueur d'une colonne cylindrique de ce liquide sous une pression connue, ε la petite diminution de cette longueur pour un accroissement donné de pression P, la vitesse du son dans ce liquide étant désignée par a sera donnée par la formule suivante :

$$a = \sqrt{\frac{PK}{D\varepsilon}}.$$

Supposons que l'on prenne pour P une pression égale au poids de 76 centimètres de mercure, on aura

$$P = (0^{m},76) \cdot g \cdot m,$$

m désignant la densité du mercure et g la force accélératrice de la pesanteur ou le double de la hauteur dont elle fait tomber les corps dans la première seconde.

La seconde étant prise pour unité de temps, on a

$$g = 9^{m},8088.$$

La vérification de ces formules appliquées aux substances liquides et solides exige des expériences très précises. La terre n'offre pas des masses solides d'une continuité et d'une homogénéité suffisantes pour des expériences de cette nature; il n'est pas probable qu'on parvienne jamais à vérifier en grand les calculs de vitesse relativement aux solides. Les expériences de M. Biot sur la transmission du son par les tuyaux en fonte de fer ont bien appris que sa vitesse surpasse de beaucoup celle de sa transmission par l'air; mais comme le son lui parvenait en moins d'une

demi-seconde, on n'en pouvait déduire qu'une évaluation très incertaine, qui ne pouvait être regardée comme suffisante pour la vérification de la formule.

L'eau nous paraît le seul corps où de telles expériences puissent être faites avec exactitude : il a été reconnu que ce liquide transmet les sons à de grandes distances. Franklin s'était assuré que le bruit de deux cailloux choqués sous l'eau est encore sensible à plus d'un demi-mille. Il ne paraît pas cependant qu'il ait songé à en mesurer la vitesse. La seule expérience qui ait été faite jusqu'ici sur la vitesse du son dans un corps liquide est due à M. Beudant; elle a été faite dans l'eau de la mer, près de Marseille, il y a peu d'années. Voici sur cette expérience quelques détails que ce savant a bien voulu nous communiquer.

Les deux observateurs, éloignés l'un de l'autre d'une distance connue, étaient munis de montres réglées et cheminant exactement ensemble; au moment fixé, celui qui devait produire le son élevait un drapeau et frappait en même temps sur un timbre placé sous l'eau. L'observateur placé à l'autre station était accompagné d'un aide qui nageait près du bateau, entendait le son, et indiquait par un signe le moment où il lui parvenait. On avait ainsi la mesure du temps que le son mettait à parcourir l'intervalle des deux stations : cette mesure n'était pas rigoureusement exacte, parce que la personne placée sous l'eau ne pouvait pas donner son signal à l'instant même où le son lui parvenait. M. Beudant a conclu de ses expériences que la vitesse du son dans l'eau de mer doit être de 1,500 mètres par seconde; mais ses diverses expériences lui ayant présenté des différences sensibles, il n'a donné ce résultat que comme une moyenne.

Il est probable que la vitesse réelle ne diffère pas beaucoup de cette moyenne, qui paraît s'accorder assez bien avec la théorie. Mais pour pouvoir établir d'une manière certaine cette comparaison, il fallait nécessairement avoir une mesure parfaitement exacte, et de plus déterminer rigoureusement la densité et la compressibilité du liquide à la température même de l'expérience. Nous avons donc pensé à reprendre avec soin et en grand ces mesures, pour lesquelles l'eau d'un lac nous a

paru convenable, comme donnant immédiatement la vitesse du son dans l'eau pure.

Dans ce but l'un de nous (M. Colladon) se rendit en Suisse, au mois d'octobre 1826, pour entreprendre, sur le lac de Genève, une série d'expériences sur la propagation du son dans l'eau pure, et pour déterminer la vitesse de cette transmission, qui n'avait point encore été mesurée.

On fit d'abord quelques essais [1] pour déterminer le meilleur moyen de produire dans l'eau des sons qui pussent être entendus à de grandes distances; on essaya successivement l'explosion d'une poudre fulminante, des chocs violents sur une enclume entièrement plongée, et enfin des coups frappés avec un marteau sur une cloche suspendue dans l'eau : ce dernier moyen fut reconnu préférable. Chaque coup frappé sur cette cloche produisait un son très bref, qui avait un timbre métallique facile à distinguer.

Ce bruit se transmettait très faiblement à l'air environnant, et à 200 mètres on ne l'entendait déjà plus; à cette distance on aurait en vain cherché à le distinguer en se rapprochant de la surface du lac, ou même en mettant l'oreille en contact immédiat avec cette surface.

Cependant lorsqu'à cette même distance on plongeait la tête entièrement dans l'eau, on entendait très distinctement chaque coup; en s'éloignant davantage le bruit conservait encore assez d'intensité pour qu'on pût le distinguer jusqu'à 2,000 mètres. Ce bruit entendu sous l'eau paraissait aussi net et aussi bref que celui qu'auraient produit deux clefs ou deux lames de couteau frappées fortement l'une contre l'autre; il avait exactement la même nature dans tous les points intermédiaires, et cette ressemblance était telle qu'il semblait toujours en écoutant que les coups étaient frappés à une très petite distance.

C'est de cette manière que furent faites les premières tentatives pour obtenir une mesure de la vitesse du son [2]. La personne qui écoutait, ne

[1] M. Sturm n'ayant pas pu m'accompagner à Genève pour m'aider dans ces expériences, j'ai dû faire en mon nom seul le récit de ces recherches sur la propagation du son. D. C.

[2] J'ai fait mes premières expériences avec l'aide de M. A. de Candolle, près de la campagne de son père, située au bord du lac. Ces expériences se faisaient la nuit et étaient fort pénibles. Je dois exprimer ici ma reconnaissance aux personnes qui ont bien voulu

pouvant apercevoir les signaux, communiquait à un second observateur l'annonce du bruit; celui-ci notait sur un chronomètre l'intervalle écoulé entre l'apparition des signaux destinés à fixer l'instant du coup et l'arrivée du son. Ce procédé n'était pas très exact ; l'intermédiaire chargé d'entendre le son ne pouvait l'annoncer avec assez de promptitude pour qu'il n'en résultât pas quelques erreurs. Ces erreurs étaient d'autant plus fâcheuses que la plus grande distance à laquelle on pouvait distinguer les coups de cloche n'était que de 2,500 mètres, et cet espace était parcouru par le son en moins de deux secondes.

Ces difficultés me suggérèrent l'idée de chercher un moyen différent pour écouter les sons dans l'eau; quelques essais me firent découvrir un appareil que je crois nouveau, et qui m'a servi à répéter ces expériences à la distance de 14,000 mètres [1].

Avant de décrire la forme de cet instrument, je crois devoir expliquer brièvement le principe sur lequel repose sa construction.

Nous avons dit que les ondes sonores transmises par le liquide ne se communiquent à l'air que dans le voisinage de la cloche; *lorsque la direction de ces ondes vient rencontrer la surface sous un angle très aigu, elles se réfléchissent dans l'intérieur de la masse liquide sans communiquer aucun ébranlement sensible à l'air qui touche cette surface.*

Il me parut probable que si l'on pouvait interrompre la continuité de cette masse en y introduisant un vase métallique plein d'air et à parois très minces, ouvert par le haut, le gaz contenu dans cette enveloppe pourrait recevoir et transmettre au dehors le mouvement vibratoire propagé dans le liquide.

L'appareil que j'ai fait construire sur ce plan m'a donné des résultats très remarquables. Je me suis servi dans mes premiers essais d'un simple tube en fer-blanc de forme prismatique; ce tube avait environ trois mè-

me seconder dans ces essais, et particulièrement à mon père et à MM. de Candolle, E. Melly et H. Darier.

[1] Quelques années plus tard, avec une cloche plus volumineuse, le même appareil acoustique m'a permis de communiquer de Nyon à Montreux, à une distance de 50,000 mètres. V. 2[me] série d'expériences au supplément.

tres de longueur et quinze centimètres de côté; il était fermé par le bas, et le fond portait un anneau auquel on suspendait un poids suffisant pour faire plonger l'instrument de deux mètres; l'extrémité supérieure était ouverte et s'élevait à un mètre au-dessus de l'eau. Lors de la première expérience avec cet instrument, j'étais éloigné de la cloche de plus de deux mille mètres; quand les coups furent frappés, on entendit très distinctement le bruit sortir du tube, et l'on aurait pu croire que ce bruit provenait du choc d'un petit corps métallique contre le bas du tube; il était assez fort pour qu'on pût l'entendre à distance, et à plus de deux mètres de l'orifice on distinguait encore chaque coup.

J'ai cherché à perfectionner cet appareil, et j'ai adopté pour mes derniers essais la forme qui est figurée dans la figure 2, planche III, les détails de l'instrument sont aussi représentés dans les figures 3, 4 et 5 de la même planche; les mêmes lettres désignent dans ces figures les mêmes parties; la figure 2 représente l'instrument tel qu'il était placé pour les expériences; il se compose d'un long tube cylindrique en fer-blanc TT, recourbé à la partie supérieure et terminé par un petit orifice I, auquel on appliquait l'oreille. Dans la partie inférieure le tube se recourbe également, mais il s'évase beaucoup comme une cuiller, et son embouchure est entièrement fermée par le plan de fer-blanc MM, dont on voit la coupe dans la figure 5.

Cet instrument augmente tellement la sensation du son que le bruit d'un coup de cloche entendu dans cet appareil à quatorze mille mètres me paraissait aussi intense que le même bruit entendu à deux cents mètres en s'immergeant simplement la tête. Il est fort probable qu'en lui donnant de grandes dimensions, il pourrait servir à communiquer sous l'eau à une distance considérable[1].

[1] Dans l'appareil dont je me suis servi, ce plan avait à peu près vingt décimètres carrés et le tube cinq mètres de longueur; la cloche pesait soixante-cinq kilogrammes. Je suis convaincu qu'en employant une cloche plus grosse et en perfectionnant ou agrandissant l'appareil pour écouter, on arriverait à communiquer facilement, sous l'eau d'un lac ou de la mer, à quinze ou vingt lieues. La possibilité d'entendre à cette distance des coups frappés sur une cloche même aussi petite que celle dont nous nous sommes servis peut être en

Ayant reconnu la possibilité d'entendre le bruit à quelques lieues, j'entrepris de nouvelles expériences sur la vitesse du son, en prenant pour points de station les deux petites villes de Rolle et Thonon, situées sur les deux rives opposées du lac, dans l'endroit de sa plus grande largeur (voyez planche IV). La distance de ces deux villes est d'environ quatorze mille mètres[1].

Cette position était très favorable pour ces mesures; la distance comprise entre ces deux villes peut être vérifiée exactement en la rattachant à celle de Genève à Langin, qui a servi de base pour la triangulation de la vallée du Léman; la profondeur moyenne de l'eau est très grande entre ces deux rives. Le fond a de chaque côté une pente à peu près égale, et il n'existe aucun bas-fond intermédiaire qui puisse intercepter le son.

La profondeur moyenne du lac entre Rolle et Thonon est de cent quarante mètres; on ne trouve d'ailleurs dans cet intervalle aucune trace de courant; l'eau y est d'une transparence remarquable et n'est point troublée par l'agitation des vagues.

On fut obligé de faire quelques modifications aux moyens employés précédemment pour indiquer l'instant où l'on frappait sur la cloche. La

quelque sorte démontrée par la supposition de plusieurs tubes semblables à celui de la figure 2, qui viendraient aboutir à l'orifice I, et multiplieraient ainsi l'intensité du son. Je dois faire observer que l'on n'entendrait absolument rien, si l'instrument acoustique n'était pas fermé par le bas et entièrement plein d'air; je m'en suis assuré par plusieurs expériences. On aurait pu croire que le bruit s'entendrait dans une cloche à plongeur; cependant j'ai fait à Rouen, en 1830, avec l'assistance de MM. Descroizille, Perrot et Courant, ingénieur des ponts et chaussées, des essais qui ne m'ont donné aucun résultat satisfaisant. Dans un moment où les eaux de la Seine étaient parfaitement calmes et le courant sensiblement nul, des coups frappés sur une cloche de même grosseur que celle dont je m'étais servi sur le lac de Genève ne s'entendaient pas à la distance de quelques cents mètres, quoiqu'on eût arrêté les pompes à air pour éviter le bruit. Il est probable que cet effet singulier doit être attribué à l'épaisseur des parois. Celles de la cloche à plongeur où nous étions étaient en fer fondu et avaient à peu près douze centimètres d'épaisseur. La pression de l'air comprimé diminuait aussi la sensibilité du tympan.

[1] Cette distance est à peu près la moitié de celle de Montlhéry à Montmartre, qu'avaient choisie les académiciens français, en 1738, pour mesurer la vitesse du son dans l'air.

En 1822, lors des expériences effectuées par les savants Gay-Lussac, Humboldt, Bouvard, Prony, Arago et Mathieu, entre Villejuif et Montlhéry, la distance était 18,613^{m} $^{1}/_{2}$.

courbure du lac entre les deux stations avait une flèche d'environ dix mètres, et de l'un de ces points on ne pouvait apercevoir les objets placés à l'autre bord près de la surface de l'eau.

On parvint à surmonter cette difficulté en faisant usage de signaux de poudre ; la flamme de cette poudre ne s'apercevait pas depuis l'autre station, mais cette lumière subite produisait un éclair parfaitement distinct, qui paraissait s'élever à plusieurs degrés au-dessus de l'horizon toutes les fois que la quantité brûlée dépassait cent cinquante grammes.

Cette poudre prenait feu à l'instant même où le marteau atteignait la cloche. Le mécanisme très simple employé dans ce but est représenté en détail dans la planche III, figure 1.

A, bateau qui porte la cloche. Cette cloche C est suspendue par une chaîne *c*, elle plonge à 15 décimètres sous la surface de l'eau. La chaîne passe sur une poulie, afin que l'on puisse faire varier la hauteur de suspension de la cloche.

Le marteau M, destiné à frapper sur cette cloche, est fixé au bout d'un long levier *m'* à *m*, courbé en équerre, et qui tourne en *a* autour d'un axe fixe. La partie horizontale *am* sert de poignée pour frapper. A cette poignée est fixée en K une petite corde, qui passe ensuite sur une poulie de renvoi Q, et va s'attacher à une autre poulie plus petite R. Ainsi, quand on abaisse la poignée *am* pour frapper la cloche, la poulie R tourne par la traction de la corde. A l'extrémité de la poutre HH', sur laquelle ce mécanisme est fixé, et près de la poulie R est une petite plaque horizontale F, sur laquelle on verse la poudre qui doit servir de signal. Au moment de l'expérience on fixe à la poulie R un bout de lance à feu allumé *ll*, et quand on frappe, cette lance s'abaissant sur le tas de poudre l'enflamme subitement. Les expériences faites par ce procédé ont acquis une telle régularité que dans les quatre ou cinq dernières séries de mesures la plus grande différence n'a jamais dépassé une demi-seconde [1].

[1] Dans toutes les expériences faites entre Rolle et Thonon, nous avons constamment

J'étais assis à l'autre station, la face tournée du côté de la cloche et la tête appuyée contre l'orifice I du tube, qu'un aide maintenait dans cette position ; j'avais ainsi l'usage de mes deux mains pour tenir et arrêter le chronomètre, et je pouvais observer avec facilité les signaux de poudre et l'arrivée du son.

Le chronomètre dont je me suis servi était à quart de seconde, et avait une détente très légère ; au moment du feu on pressait la détente pour faire marcher l'aiguille, et on l'arrêtait à l'arrivée du son. L'espace parcouru sur le cadran indiquait le temps que le son avait mis à arriver.

Il s'écoulait nécessairement un petit intervalle entre le moment où je voyais la lumière et celui où je touchais la détente. Il y avait aussi un retard semblable après la sensation du son ; mais ce second retard devait être un peu moindre, et voici pourquoi : si l'on veut opérer un mouvement à un signal déterminé, il y a toujours un intervalle de temps entre la sensation reçue et l'action qui en est la suite, et ce temps est d'autant plus long que l'apparition du signal est plus difficile à prévoir. Dans ces expériences la préparation de la poudre et de la lance à feu exigeait quelques précautions. La personne chargée de frapper la cloche donnait rarement le coup à l'instant exact fixé à l'avance, et la lumière m'apparaissait presque toujours d'une manière inattendue ; tandis que le son, arrivant régulièrement après le signal de poudre, était facilement prévu, surtout dans les dernières expériences. Je suppose donc que les temps observés sur le chronomètre pour la transmission du son sont un peu trop courts d'une quantité très petite qu'on ne pourrait évaluer, mais qui ne doit certainement pas dépasser un quart de seconde.

Les deux stations avaient été prises dans la direction d'une ligne

opéré d'après la marche suivante pour ces mesures; nous avions, à chaque station, des chronomètres qui marchaient ensemble, de quinze minutes en quinze minutes on faisait une expérience. Pour éviter que le bruit de la cloche ne pût se confondre avec des bruits étrangers, on frappait toujours trois coups de suite à un intervalle d'une seconde; les deux derniers servaient seulement à vérifier la nature du bruit, et n'étaient accompagnés d'aucune lumière. J'ai supprimé dans les séries toutes les expériences dans lesquelles le coup principal n'avait pas été suivi du bruit des deux coups additionnels.

droite menée du clocher de Thonon à l'une des tours du château de Rolle; chaque bateau était fixé à deux cents mètres du bord.

On a fait entre ces deux distances plusieurs expériences à dés jours différents; nous rapporterons seulement les trois dernières séries qui sont les plus régulières.

TEMPS OBSERVÉS.		
7 NOVEMBRE.	15 NOVEMBRE.	18 NOVEMBRE.
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$	9
$9\frac{1}{4}$	9	$9\frac{1}{4}$
9	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{2}$
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
9	$9\frac{1}{4}$	9
$9\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{1}{4}$
$9\frac{1}{4}$		$9\frac{1}{2}$
		$9\frac{1}{4}$
		$9\frac{1}{4}$
		$9\frac{1}{4}$

On voit par ce tableau que le temps écoulé entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son était plus grand que 9″ et plus petit que $9''\frac{1}{2}$; sa valeur moyenne est un peu au-dessus de $9\frac{1}{4}$. Si nous évaluons à

moins d'un quart de seconde la petite erreur dont nous avons parlé plus haut, nous pourrons adopter 9″,4 pour le temps que le son mettait réellement à venir d'une station à l'autre.

Comparons maintenant ce temps avec la distance des deux stations. La seule mesure connue de cette distance avait été prise par MM. de Saussure et Pictet, qui avaient trouvé 7,330 toises ou 14,237 mètres pour la distance du clocher de Thonon à la tour de Rolle. N'ayant pu me procurer les résultats mêmes de leur triangulation, et désirant vérifier l'exactitude de ce nombre, j'ai prié M. J. Mayer de Genève, ingénieur géographe très habile[1], de vérifier cette mesure, en prenant pour base la distance de la tour Saint-Pierre de Genève à la tour de Langin, située au pied de la montagne des Voirons, distance qui a été mesurée à deux époques différentes, avec un très grand soin, pour servir à une triangulation de la vallée du Léman.

Le premier triangle comprenait Genève, Langin, Rolle; le second Langin, Rolle et Thonon. Cette mesure directe a donné 14,240 mètres pour la distance du château de Rolle au clocher de Thonon. Le château de Rolle est situé sur le bord même du lac; quant au clocher de Thonon, sa projection est éloignée du bord de 353 mètres, ce qui donne 13,887 mètres pour la distance des deux rives.

En retranchant 400 mètres pour les distances des deux bateaux aux deux rives, on a 13,487 mètres pour la distance des deux stations. Ce nombre peut être regardé comme exact à moins de 20 mètres près.

Le temps que le son employait à parcourir cet espace était à très peu près de 9″,4, comme nous l'avons dit plus haut. En divisant l'espace 13,487 mètres par le temps 9″,4, on aura la vitesse du son, ou l'espace qu'il parcourt dans une seconde. On trouve ainsi 1,435 mètres pour la vitesse réelle du son dans l'eau[2].

[1] M. John Meyer a exécuté, de 1860 à 1880, pour le compte du gouvernement des États-Unis de l'Amérique du Nord, le relevé géographique des territoires compris entre les lacs Huron, Michighan et Supérieur.

[2] Pour apprécier jusqu'à quel point ce nombre peut être exact, faisons observer que, si

Avant de discuter les résultats de ces mesures pour les comparer à ceux du calcul, je rapporterai sommairement quelques observations que j'ai pu faire pendant le cours de ces expériences.

La première remarque sur laquelle j'ai déjà insisté précédemment est relative à la ressemblance remarquable des sons entendus dans l'eau à des distances très différentes. Le bruit des coups était aussi net et aussi bref à treize mille mètres qu'à cent mètres de la cloche; il aurait été impossible de discerner un coup fort, entendu à la première distance, d'un choc plus faible écouté de près. On sait qu'il n'en est pas de même dans l'air : à mesure qu'on s'éloigne du corps sonore, le son diminue d'intensité, mais en même temps il change de nature, il devient plus sourd, plus prolongé. Des coups frappés à très petits intervalles produisent, lorsqu'ils sont entendus de loin, le même effet qu'un bruit continu; dans l'eau au contraire l'intervalle entre les coups reste sensiblement le même, quelle que soit la distance qui sépare la cloche de l'observateur. Cette différence remarquable s'explique par la nature des ondes sonores transmises dans l'eau.

Le calcul indique en effet que dans le mouvement vibratoire d'un corps fluide, la durée de l'agitation d'une particule est égale au rayon de la portion sphérique du fluide, que l'on suppose primitivement ébranlée à l'origine du mouvement, divisée par la vitesse de transmission du son. La première de ces deux quantités est nécessairement plus petite dans l'eau que dans l'air; la seconde au contraire est plus grande; ainsi la durée de la sensation d'un son doit être en général plus courte quand il est transmis par l'eau que quand il se propage dans l'air.

l'on prenait pour la distance des deux stations 13,500 mètres, nombre que je crois trop fort, et pour la durée de la transmission du son 9″ $^1/_4$, nombre trop petit, on aurait pour la vitesse la plus grande valeur qu'on puisse supposer, savoir 1,459 mètres; mais cette quantité est certainement trop grande. Si, au contraire, on prenait la plus petite valeur possible pour la distance, c'est-à-dire 13,386 mètres moins 20 ou 13,366 mètres, et pour le temps sa plus grande valeur 9″,5, on aurait la plus petite valeur possible de la vitesse, savoir 1,417 mètres. On voit, par la détermination de ces limites, que si la vitesse véritable n'était pas égale à 1,435 mètres, elle ne pourrait pas, du moins, différer de ce nombre, soit en plus, soit en moins, de plus de 24 mètres; de sorte que l'erreur possible dans cette expérience ne peut pas s'élever au-dessus de $^1/_{60}$ de la valeur véritable.

Cette brièveté des sons propagés sous l'eau les rend si faciles à distinguer, qu'après quelques expériences le bruit du vent ou l'agitation de l'eau ne m'empêchait pas d'entendre les coups de cloche, de même que dans l'air le bruit d'un sifflet se distingue dans une tempête.

L'expérience du 18 novembre citée plus haut a été terminée par un vent très fort; le lac, qui était d'abord parfaitement calme, devint fortement agité, et l'on fut obligé de maintenir le bateau par plusieurs ancres; cependant, malgré le bruit des vagues, qui frappaient le tube et les flancs du bateau, je pus prendre encore plusieurs mesures, qui n'ont point différé de celles que j'avais observées précédemment.

Je terminerai cette digression par une troisième remarque sur l'influence remarquable des écrans interposés entre la cloche et le tube pour diminuer l'intensité du son. Voici l'expérience qui a donné lieu à cette observation. Pendant une suite d'essais que je fis avec M. A. de Candolle, nous avions choisi pour la cloche et le tube pour un de ces essais deux stations d'un même côté de la rive du lac et près de cette rive. Dans l'intervalle, il y avait un mur qui s'avançait perpendiculairement dans le lac à douze ou quinze mètres; quand la ligne droite qui joignait les deux stations passait au delà de ce mur, le son était très intense; mais quand cette ligne rencontrait le mur, même assez près de son extrémité, l'intensité du son diminuait aussitôt. Cette différence offre un point de rapprochement curieux entre la propagation des sons dans l'eau et celle de la lumière dans les milieux transparents.

Je terminerai ces observations en faisant remarquer combien cette facile transmission du son dans l'eau justifie les idées théoriques que l'on s'est formées sur la constitution de ce fluide et sur sa parfaite élasticité.

Le travail dépensé pendant moins d'une seconde par la personne qui frappait la cloche produisait un choc qui ébranlait successivement une masse d'eau énorme, dont toutes les molécules subissaient à leur tour l'impression de ce choc. La quantité d'eau qui, dans ces expériences, avait dû recevoir successivement un mouvement capable d'agir sur nos organes ne peut être évaluée à moins de vingt-cinq mille milliards de kilogram-

mes[1]. C'est un des exemples les plus frappants que l'on puisse citer de la vérité expérimentale du principe de la transmission des forces vives.

Le jour de l'expérience du 18 novembre je m'étais fait conduire entre les deux stations pour prendre la température de l'eau en différents endroits de la largeur du lac, à la profondeur de trois et six mètres, au moyen d'un thermomètre dont la boule était recouverte de cire; je trouvai la température partout la même à ces deux profondeurs : elle était de 8°,2 degrés centigrades près de Thonon, 8°,1 au milieu du lac, et 7°,9 près de Rolle : la valeur moyenne est 8°,1.

Pour comparer ces résultats avec ceux du calcul, il fallait déterminer avec beaucoup de soin la compressibilité de cette eau à cette température, ainsi que le rapport de sa densité à celui de l'eau distillée à 0°.

L'eau du lac, à une distance suffisante de l'embouchure du Rhône, peut être regardée comme parfaitement pure; à peine contient-elle $\frac{1}{2000}$ de son poids de matières étrangères. M. Tingry en a donné des analyses qui peuvent être regardées comme les meilleures, parce qu'il a opéré sur de grandes masses. Il les a faites en été et en hiver. Nos expériences ayant été faites à la fin de novembre, nous donnerons seulement ici la moyenne de ces deux analyses, qui d'ailleurs ne diffèrent pas beaucoup entre elles.

MOYENNE DE DEUX ANALYSES DE L'EAU DU LAC DE GENÈNE, PAR M. TINGRY.

24,475 grammes de cette eau contiennent :

82 centilitres $\frac{796}{1000}$ de gaz (composé principalement d'air contenant plus d'oxygène que l'air atmosphérique) ;

1 gr. 722 carb. chaux;

0 gr. 172 carb. magnésie ;

[1] La surface du lac Léman est de 577,860,000 mètres carrés.

0 gr. 212 muriate de magnésie;
0 gr. 861 sulfate de chaux;
0 gr. 848 sulfate de magnésie;
0 gr. 040 argile siliceuse;
0 gr. 172 partie;

ce qui donne pour un kilog. d'eau 0 gr. 164 de matière étrangère non gazeuse, c'est-à-dire un peu moins de $\frac{1}{6000}$ du poids total.

La densité de l'eau du lac est à très peu près 1,00015 à 4°, celle de l'eau distillée à 4° étant prise pour unité. Et comme le volume de l'eau augmente de 0,00013 quand elle passe de 4° à 8°,1, la densité de l'eau dans laquelle on a mesuré la vitesse du son était égale à l'unité, plus une fraction tout à fait négligeable.

Quelque petite que fût la quantité de matière étrangère contenue dans cette eau, nous avons cru devoir déterminer directement sa compressibilité, au lieu de la supposer égale à celle de l'eau distillée. On a pris cette mesure sur de l'eau recueillie à la surface dans une partie intermédiaire entre les deux stations; cette eau a été introduite dans un très bon piézomètre, avec les précautions indiquées précédemment pour la compressibilité de l'eau saturée d'air.

Une série d'expériences faites à la température de 8°, depuis une jusqu'à vingt atmosphères, a donné, pour la compression moyenne par chaque atmosphère, 46,18 millionièmes, la température du manomètre étant de dix degrés. Le manomètre ayant été gradué sous la pression de 0,7466 de mercure, il faut, pour ramener cette compression à celle d'une atmosphère de $0^m,76$, la multiplier par le rapport 7600/7466; cette multiplication donne 47,01 millionièmes pour la compressibilité apparente. Il n'y a pas de correction à faire pour la température du manomètre.

Si à ce nombre 47,01 on ajoute 1,65 pour la contraction du verre, *la somme 48,66 millionièmes représentera la compressibilité réelle de l'eau du lac pour chaque atmosphère de* $0^m,76$ *de mercure, la température de cette eau étant de 8° centigrades.*

Reprenons maintenant la formule de la vitesse du son que nous avons rapportée plus haut, afin d'y substituer les valeurs que nous venons de déterminer; cette formule est

$$a = \sqrt{\frac{\mathrm{P\,K}}{\mathrm{D}\,\varepsilon}}.$$

En se rappelant quelles sont les quantités désignées par D, K, ε et P, on a pour l'eau du lac de Genève à la température de 8°,1 :

$$\mathrm{D} = 1\,; \qquad \mathrm{K} = 1{,}000{,}000\,; \qquad \varepsilon = 48{,}66.$$

Si l'on prend pour P la pression d'une atmosphère de $0^{m},76$ de mercure à la température de 10°, qui est celle à laquelle notre manomètre a été fixé, en désignant par m la densité de ce mercure, et par g la force accélératrice de la pesanteur, ou le double de la hauteur dont elle fait tomber les corps dans la première seconde, on a :

$$\mathrm{P} = (0^{m},76).g.m.$$

La valeur de g est, comme on le sait,

$$g = 9^{m},8088.$$

La densité du mercure à 0° est, d'après les expériences de MM. Dulong et Petit, égale à 13,568; celle de l'eau distillée à 3°,90 étant prise pour unité. D'ailleurs, la dilatation du mercure est de 0,00018 pour chaque degré d'accroissement de température, et, par conséquent, de 0,0018 pour 10°. Le mercure passant donc de 0 à 10°, son volume augmente dans le rapport de 1 à 1,0018. La densité du mercure à 10° sera donc égale à sa densité à 0° ou 13,568 divisée par 1,0018; de sorte qu'on a :

$$m = \frac{13,568}{1,0018} = 13,544.$$

Substituant donc dans la formule de la vitesse du son toutes ces valeurs :

$$D = 1\,; \qquad K = 1,000,000\,; \qquad \varepsilon = 48,66\,;$$
$$P = (0^{m},76).(9,8088).(13,544)\,;$$

on trouve, en effectuant ce calcul,

$$a = 1437^{m},8.$$

Telle est la détermination théorique de la vitesse du son dans l'eau déduite de la densité et de la compressibilité de ce liquide, dans l'hypothèse qu'il n'y a point de chaleur dégagée par la compression rapide des molécules liquides qui puisse élever leur température.

Dans nos expériences, la distance 13,487 mètres a été parcourue en 9″,4, ce qui donne, pour la vitesse mesurée,

$$\frac{13487}{9,4} = 1435 \text{ mètres}\,;$$

ainsi ces deux mesures ne diffèrent que d'environ trois mètres. Cette coïncidence remarquable, en confirmant les observations contenues dans la seconde partie de ce mémoire, peut servir à démontrer mieux que toute expérience directe que la compression de l'eau ne fait pas varier sa température.

SECONDE SÉRIE D'EXPÉRIENCES

SUR LA

PRODUCTION ET LA TRANSMISSION DU SON DANS L'EAU

FAITES DANS LE LAC DE GENÈVE

PAR M. DANIEL COLLADON

Juillet et août 1841.

Depuis le mois de novembre 1826 jusqu'au mois de juillet 1841, il m'avait été impossible d'entreprendre de nouvelles expériences sur la transmission du son dans l'eau. C'est seulement à cette dernière époque que j'ai pu y consacrer quelques semaines, et ce sont les résultats de ces essais que je vais exposer [1].

§ I. Lorsqu'on écoute simultanément dans l'eau et dans l'air, et à quelques cents mètres de distance, les coups frappés sur une longue et forte barre d'acier ou de bronze, suspendue et à moitié immergée, on

[1] D'après ma lettre à M. Arago, séance du 23 août 1841, *Comptes rendus*, t. XIII, second semestre, et *Bibliothèque universelle de Genève*, août 1841.

entend, en s'aidant de mon tube acoustique[1], deux sons, ou bruits successifs, distincts; le premier, celui transmis par l'eau, paraît d'abord moins intense que le second arrivé dans l'air; mais à mesure que l'on s'éloigne du corps sonore, le rapport d'intensité de ces deux sons se modifie et, à une distance suffisante, le bruit perçu dans l'eau au moyen de l'appareil acoustique devient beaucoup plus intense que celui arrivé directement dans l'air.

En augmentant ensuite beaucoup la distance, on continue de percevoir très nettement les sons transmis par l'eau, mais il n'est plus possible d'entendre, même de nuit et par un temps très calme, aucun son transmis dans l'air.

J'ai répété cette expérience d'une autre manière, en me servant d'une cloche pesant soixante-cinq kilogrammes; elle était suspendue à une mouffle et pouvait être alternativement immergée et frappée dans l'eau, ou suspendue et frappée dans l'air avec un fort marteau et à des instants convenus.

Les résultats, qui ont été les mêmes que ceux obtenus avec la disposition précédente, démontrent que *l'eau est bien supérieure à l'air pour transmettre les sons à de grandes distances.*

Lorsque le corps sonore sur lequel on frappe est complètement immergé et maintenu à deux ou trois mètres sous la surface de l'eau, on peut encore entendre dans l'air jusqu'à une faible distance le bruit des coups frappés, mais on ne les entend plus au delà de deux cents à trois cents mètres. Les vibrations qui se propagent dans l'eau paraissent subir alors, *à l'instar des rayons lumineux, une réflexion totale à leur rencontre avec la surface intérieure du liquide.*

§ II. Avant de décrire les nouvelles expériences faites à de grandes distances dans le lac de Genève, je dois énumérer quelques faits intéressants constatés pendant les mois de juillet et d'août 1841.

[1] Décrit et figuré dans le mémoire de 1827, tome V des *Savants étrangers*, Pl. III.

Si l'on fait vibrer sous l'eau un corps sonore plus dense que ce liquide, les vibrations ne s'éteignent pas immédiatement, elles subsistent pendant un certain temps qui augmente avec le volume du corps, sa densité, son élasticité et la violence des coups frappés.

Si, à la distance de trois ou quatre mètres d'une grosse cloche de bronze entièrement immergée et mise en vibration par un choc énergique, on tient à la main une barre métallique plongée en partie, la main ressent pendant deux ou trois secondes un fort mouvement vibratoire transmis à la barre.

Si une cloche de cristal, de 18 à 20 centimètres, tenue à la main et entièrement immergée, est frappée dans le liquide, en la sortant de l'eau une seconde après le choc et en l'approchant de l'oreille, on peut s'assurer que ses vibrations durent encore.

On conçoit d'après ces faits comment les sons perçus avec mon appareil hydro-acoustique, quoique plus brefs que ceux transmis par l'air, reproduisent cependant à un notable degré, l'acuité des sons, leur valeur musicale, et permettent d'apprécier le timbre des corps frappés.

Il était intéressant d'essayer ce que deviendraient dans l'eau les airs musicaux joués par un instrument métallique.

J'ai immergé à la profondeur de trois ou quatre mètres une boîte à musique de moyenne dimension, ayant un fort ressort moteur, placée tantôt sous une cloche d'air qui la recouvrait, d'autres fois en me contentant de l'immerger.

Le rythme des airs joués par cette boîte à musique, écoutés à l'aide de mon appareil hydro-acoustique, se reconnaissait facilement, même à des distances de 500 et 600 mètres.

Il m'a paru que les notes aiguës étaient plus faciles à percevoir sous l'eau à de grandes distances que les sons graves. Le rythme était plus lent et bien moins distinct quand l'instrument était simplement immergé. Mais ce fait n'a rien d'étonnant, il est dû à l'influence de l'eau qui éteignait plus rapidement les vibrations des lames sonores.

Pour n'être pas gêné par les bruits étrangers, j'expérimentais de

grand matin ou pendant la nuit; j'avais loué pour quelques semaines une maison de campagne dite « *port Boissier,* » sur la rive gauche du lac, à un kilomètre du port de Genève, pour mettre à l'abri mes nombreux instruments et y loger.

Ce port Boissier est distant de 6 kilomètres d'une baie abritée du vent du nord, située sur la rive droite du lac et appelée *port Genthod.* Les grandes barques y stationnent assez fréquemment.

Un matin, au lever du jour, *j'entendis distinctement dans mon appareil acoustique le bruit très reconnaissable de chaînes agitées sous l'eau,* j'aperçus au même moment dans le port de Genthod une barque qui appareillait pour mettre à la voile.

J'ai pu constater les jours suivants, avec le secours d'une lunette d'approche, que ce bruit pouvait être entendu dans mon appareil chaque fois qu'une grande barque levait son ancre dans ce port, malgré son éloignement de six kilomètres; ce bruit spécial se distinguait nettement et coïncidait avec les observations faites dans la lunette d'approche sur les mouvements des matelots employés à la manœuvre

Avec un très grand appareil acoustique, le bruit du maniement des chaînes d'un vaisseau de guerre pourrait être entendu à 20 à 25 kilomètres. Dans une guerre maritime, des observations de ce genre pourraient avoir une notable importance.

Lorsque les bateaux à vapeur du lac passaient à quelques centaines de mètres du port Boissier, j'entendais très distinctement le jeu de leur machines motrices et je comptais facilement le nombre des coups de piston. Un de ces bateaux, l'*Helvétie*, avait une détente à clapet produisant un son très sec que je distinguais encore à la distance de quelques kilomètres.

D'autre part, les aubes des roues des bateaux à vapeur en frappant l'eau ne produisaient qu'un bourdonnement confus qui, de loin, ressemblait au bourdonnement d'une abeille.

Les intonations parlées peuvent se transmettre à une très petite distance sous l'eau, mais si la personne qui parle est placée sous une

cloche de plongeur, il est impossible de distinguer les articulations à la distance de deux ou trois mètres.

§ III. **Expériences de transmission des sons dans l'eau à de grandes distances.**

Depuis que j'avais constaté, en 1826, qu'avec une cloche pesant soixante-cinq kilogrammes et un appareil hydro-acoustique de dimensions très restreintes [1], j'avais pu entendre les coups frappés *à plus de 13,000 mètres*, même quand le lac était agité [2], j'avais acquis la conviction qu'avec une plus grosse cloche et avec un appareil acoustique de plus grandes dimensions, on pourrait communiquer dans un grand lac ou dans la mer, à la distance de cent kilomètres, peut-être même au delà, *et en tirer parti pour des communications télégraphiques sous-marines.*

Il m'avait été impossible en novembre 1826 de poursuivre mes expériences sur la transmission des sons dans l'eau à de plus grandes distances, la saison était défavorable et d'ailleurs M. Sturm m'attendait à Paris pour nos expériences sur la compressibilité des liquides.

Mais depuis cette époque, je m'étais proposé d'étendre ces essais entre des points plus distants que Thonon et Rolle, et d'opérer, si possible, pendant les mois d'été.

C'est seulement quinze ans plus tard, en 1841, pendant les mois de juillet et d'août, que j'ai pu réaliser ce projet.

Je me proposais surtout trois buts principaux :

1° Essayer si avec un appareil hydro-acoustique plus grand et une

[1] Voir le mémoire précédent, p. 68, les deux derniers alinéas et la note qui suit; le plan M, qui fermait le bas du tube acoustique en forme de cuiller, n'avait que vingt décimètres carrés de surface. V. pl. 111.

[2] Voir ce mémoire à la page 75, second alinéa.

cloche plus volumineuse, je pourrais entendre des coups frappés à la distance de cinquante kilomètres, longueur maxima de la partie est du lac Léman, appelée le *grand lac*, et cela en vue d'un moyen télégraphique entre la France et l'Angleterre.

2° Renouveler, si possible, les expériences sur la vitesse du son dans l'eau, lorsque sa température serait supérieure d'environ dix degrés à celle trouvée en novembre 1826, laquelle était de 8 degrés centigrades.

3° Essayer, selon le désir que m'avait transmis M. Arago, si on pourrait constater dans le grand lac (dont les bords sont en quelques endroits en talus très raides, et dont la profondeur maxima est supérieure à 300 mètres, le bruit d'un écho répercuté, soit par les bords, soit par le fond du lac, en vue d'un procédé économique et rapide pour estimer les très grandes profondeurs de la mer, à l'aide de la vitesse connue du son dans l'eau et en prenant la moitié du temps écoulé entre le coup frappé sur une cloche immergée et le retour du son répercuté par le fond de la mer.

Pour pouvoir apprécier la valeur comparative de deux appareils acoustiques semblables, mais de dimensions très différentes, il fallait posséder un instrument pouvant donner à volonté des sons bien égaux en intensité.

Dans ce but j'ai fait construire un mécanisme représenté dans la planche V à la fin de cette notice :

AB est une perche longue de cinq à six mètres, portant à une de ses extrémités B un timbre C et un marteau frappeur M, et à son autre extrémité A, un petit mécanisme destiné à mettre en action le marteau qui doit frapper le timbre avec une force toujours égale.

Pour cela, le levier K, placé en A, peut être poussé en arrière avec la main et sert à faire reculer d'une quantité toujours la même, jusqu'à ce qu'il soit arrêté par l'arrêt Y, un fil de métal F,F′, et le levier L du

marteau M, en mettant chaque fois en un même état de tension le ressort en hélice RR', destiné à lancer le marteau sur le timbre C et à produire les chocs d'égale intensité. (Voir la planche V, et pour les détails secondaires sa légende explicative.)

Lorsque le timbre et le marteau frappeur sont employés sous l'eau, chaque mouvement en arrière imprimé au levier K jusqu'à son arrêt Y correspond à un choc d'une force constante du marteau sur le timbre C, on peut ainsi faire des expériences comparatives à des distances variées de l'observateur qui écoute ces chocs dans un appareil hydro-acoustique.

Possédant encore l'instrument qui m'avait servi en 1826 pour écouter à Thonon les coups frappés à Rolle sur une cloche de soixante-six kilogrammes, je fis construire un second appareil neuf ayant la même longueur, mais dont la partie inférieure en forme de cuiller avait une longueur et une largeur exactement double du premier.

Le plan M', qui fermait cette embouchure avait par conséquent une surface quadruple comparativement au plan M, de l'appareil de 1826 (voyez Pl. III).

J'ai comparé les distances auxquelles je cessais d'entendre avec chacun de ces deux instruments les coups frappés sur le timbre; cette comparaison ne pouvait être qu'approximative, mais il m'a paru ainsi qu'à mon aide, que l'appareil neuf permettait d'entendre le bruit des chocs du timbre à une distance au moins double de celle où l'on cessait d'entendre avec l'appareil de 1826 [1].

J'étais en quête d'une cloche, quand j'appris qu'il venait d'en être fondue une du poids de cinq cents kilogrammes pour l'église catholique de Lancy et que le baptême devait avoir lieu très prochainement. Louis

[1] J'ai pu vérifier avec cet instrument, la supériorité incontestable de l'eau, comparativement à l'air, pour transmettre des sons à de grandes distances. Les coups frappés sur le timbre C placé dans l'eau pouvaient être entendus avec l'appareil acoustique, à une distance au moins décuple de la distance à laquelle on pouvait entendre ces mêmes coups, lorsque le marteau frappait le timbre placé dans l'air.

Burgy était mon ancien camarade d'étude et il était alors colonel dans les milices, maire de ce village et cousin d'un évêque qui devait assister à la cérémonie. — Par l'influence de mon ami, j'obtins de pouvoir disposer de cette cloche à condition qu'elle serait rendue à jour fixe pour le baptême qui était déjà arrêté.

Je me hâtai de la faire transporter à Nyon, où commence le grand lac, je louai une petite barque pontée et je fis installer la cloche à l'arrière de cette barque, avec une chèvre qui permettait de l'élever ou de l'abaisser sous l'eau.

Je fis arriver cette barque au nord-est de Promenthoux, pointe qui s'avance dans le lac à 2500 mètres de Nyon, et je fis installer des signaux de poudre comme ceux de 1826, mais avec une plus grande surface et qui permettait d'aller au besoin à une livre de poudre, parce que la distance et la rondeur de la terre étaient plus grandes.

Un marteau pesant dix kilogrammes fut installé pour frapper la cloche, celle-ci fut descendue à plus de deux mètres sous l'eau et le marteau fut dans toutes les expériences, manœuvré par un seul homme, qui pouvait frapper un coup toutes les deux secondes.

Pendant ce temps, accompagné de M. Muller, astronome adjoint à l'observatoire de Genève, je me rendais à Grandvaux près Cully, à la distance de trente-cinq mille mètres, où devait se faire la première observation, le soir du 5 août à neuf heures.

La nuit venue, nous fûmes contrariés de voir la lune se lever dans un ciel sans nuage et nous ne pûmes observer aucun signe lumineux aux moments fixés pour frapper (la même chose se répéta le lendemain). Mais par contre nous entendîmes dans les deux appareils les coups frappés, avec une netteté parfaite.

A minuit, selon ce qui avait été convenu, je nous fis conduire à Veytaux, nous fîmes ce trajet en bateau avec quatre rameurs, et nous nous installâmes à la distance de cinquante kilomètres de la cloche, pour savoir si nous pourrions entendre les coups frappés. A 8 heures, heure convenue, nous eûmes la satisfaction de les entendre dans les deux appareils;

ainsi il est certain que nous aurions entendu avec l'appareil le plus grand, M′, à une distance double, c'est-à-dire à cent kilomètres et peut-être au delà, car il n'est pas certain que le petit appareil acoustique fut arrivé à sa limite.

C'était plus qu'il n'en fallait pour aller de France en Angleterre par un nouveau moyen télégraphique, et lorsque trois ans plus tard, je dirigeais pour l'Amirauté anglaise la construction d'un appareil dynamométrique de mon invention pour ses grands bateaux à vapeur, je pensai demander à cette même Amirauté un ordre pour Plymouth, pour correspondre avec Cherbourg, où le ministre de la marine française m'avait recommandé.

Je m'ouvris sur ce projet, en octobre 1844, à Charles Wheatstone, avec lequel je dînais habituellement à l'Atheneum Club, il me dit que si je voulais prendre le thé chez lui le soir, nous causerions de ce projet.

J'allai au rendez-vous, et là, après qu'il m'eut fait promettre le secret de ne révéler à personne ce qu'il allait me montrer et que lui et moi connaîtrions seuls, il ouvrit une cassette dont la clef pendait à sa montre et me montra tout le projet d'un télégraphe sous-marin entre l'Angleterre et la France. Le câble devait être enroulé à l'arrière sur une roue à part, comme on l'a employé plus tard. Je remerciai vivement l'auteur de cette communication, qui avait déjà expérimenté sur un fil recouvert de gutta-percha, faisant des zigzags dans la Tamise au-dessus de Londres, sur une longueur de quinze milles, et je renonçai à mes essais entre Plymouth et les environs de Cherbourg. Quant à l'essai d'un premier télégraphe entre la France et l'Angleterre par un fil électrique, ce n'est que sept ans après qu'il s'est réalisé, à la fin de l'année 1851 [1].

[1] Les expériences sur un écho répercuté par le fond du lac ne purent avoir lieu et n'offraient pas d'ailleurs de résultat pratique,

La profondeur du lac étant au maximum de 330 mètres, le double cette longueur soit 660 mètres aurait été parcouru en moins de demi-seconde. Ce n'est qu'à la mer où l'on trouve des fonds qui dépassent 15 et 20 fois cette profondeur que cette méthode serait applicable.

Les expériences du son dans l'eau perdaient ainsi leur principale application, mais ces expériences peuvent encore servir avec avantage dans la marine, soit en facilitant les communications lorsqu'un brouillard ne permet pas de voir des navires qui doivent marcher de conserve, soit en servant de signal de ralliement à des navires éloignés de près de cent kilomètres.

Avant de terminer ce récit, je dois insister sur la parfaite élasticité de l'eau. La demi-force vive développée par le travail d'un homme pendant une seule seconde, c'est-à-dire *douze kilogrammètres,* suffisait pour mettre en mouvement cette masse énorme de cinquante milliards de Kilogrammes ~~mètres cubes~~ d'eau liquide, qui recevait et transmettait successivement un mouvement assez fort pour qu'il put être perçu avec l'appareil acoustique. C'est le plus fort argument que l'on puisse citer de la parfaite élasticité de l'eau liquide et de la conservation des forces vives.

Fig. 6.

Manomètre provisoire pour graduer le manomètre vertical P. S.

a b c d

Piézomètre vide ouvert en i.

i r u n n z y

Fig. 2.

Fig. 3. Piézomètre plein fermé en i.

i r u n

Fig. 1.

Manomètre vertical en place.

Echelle 1/12

Fig. 4.

Manomètre vertical en place, vue en Coupe

Fig. 5.

Tube gradué du Manomètre vertical.

Caisse pleine d'eau

A r u t t n y z B M

G G G o L s t n q m K C C F D E E

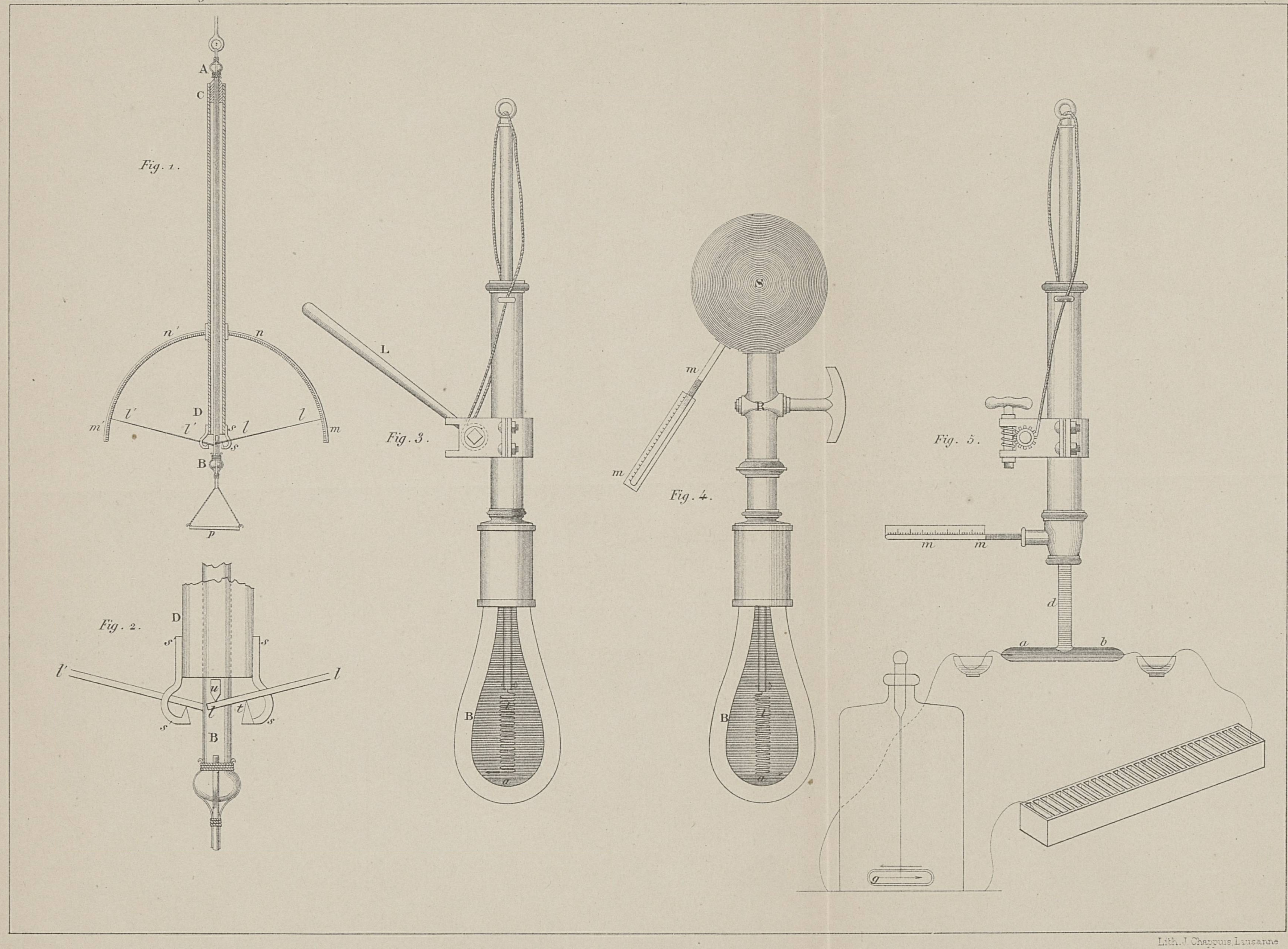
Mercure

Pompe de Compression

Piézomètre pendant une expérience.

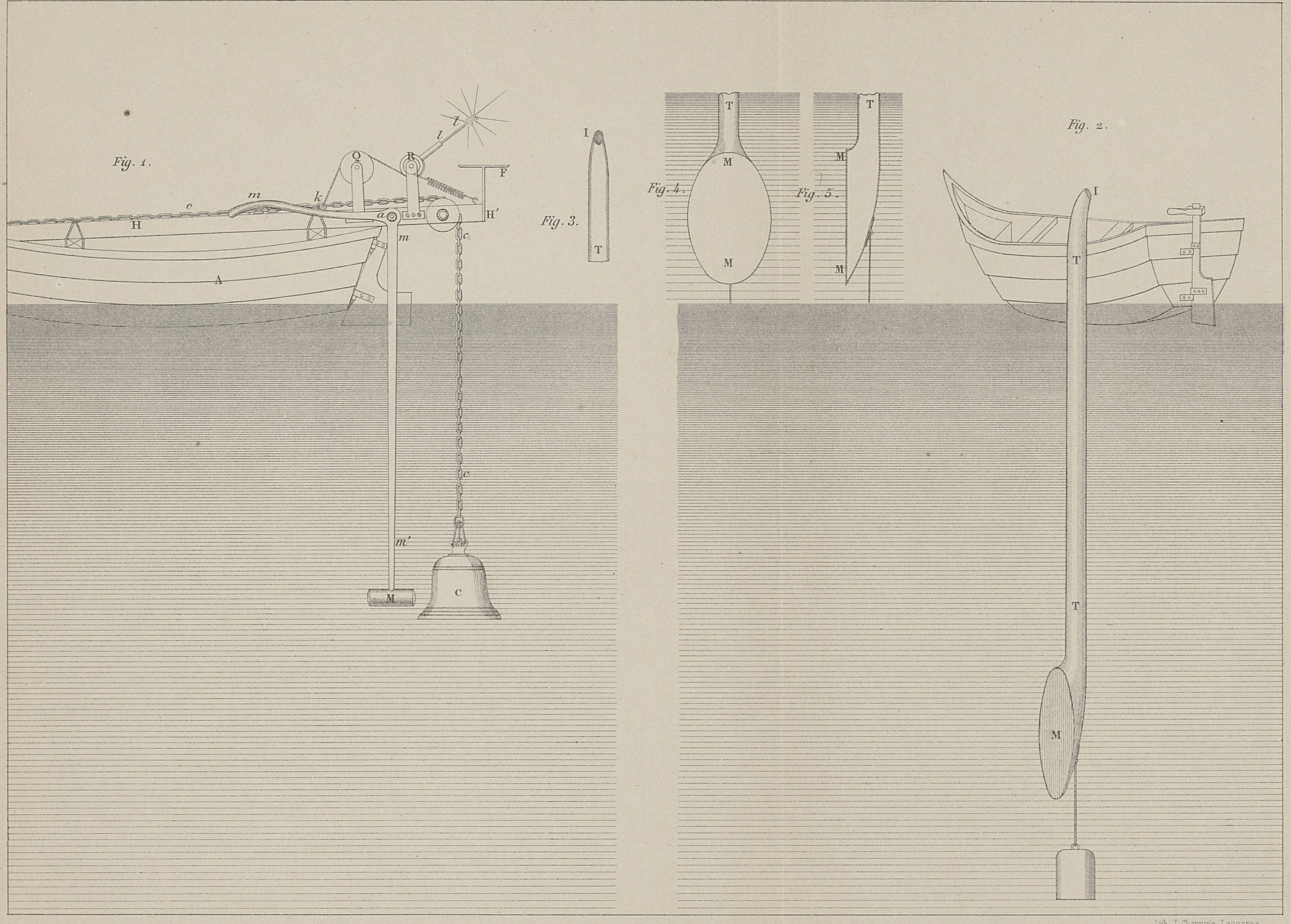
Lith. J. Chappuis, Lausanne

EXPÉRIENCES SUR LA COMPRESSIBILITÉ DES LIQUIDES



Lith. J. Chappuis Lausanne

EXPÉRIENCES SUR L'EXTENSION DU VERRE ET LA COMPRESSION DES LIQUIDES



Lith. J. Chappuis, Lausanne.

EXPÉRIENCES SUR LA VITESSE DU SON DANS L'EAU.



Bureau topog. fédéral, Report de 1885.

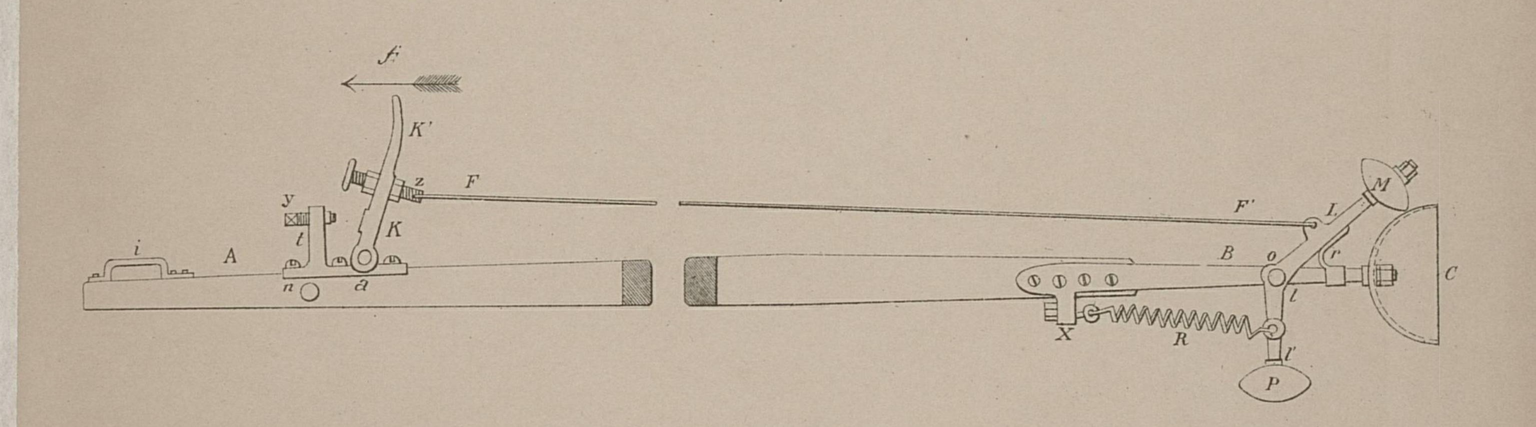
Lith. J. Chappuis, Lausanne.

EXPÉRIENCES SUR LA VITESSE DU SON DANS L'EAU

Instrument pour produire des sons d'égale intensité

LÉGENDE

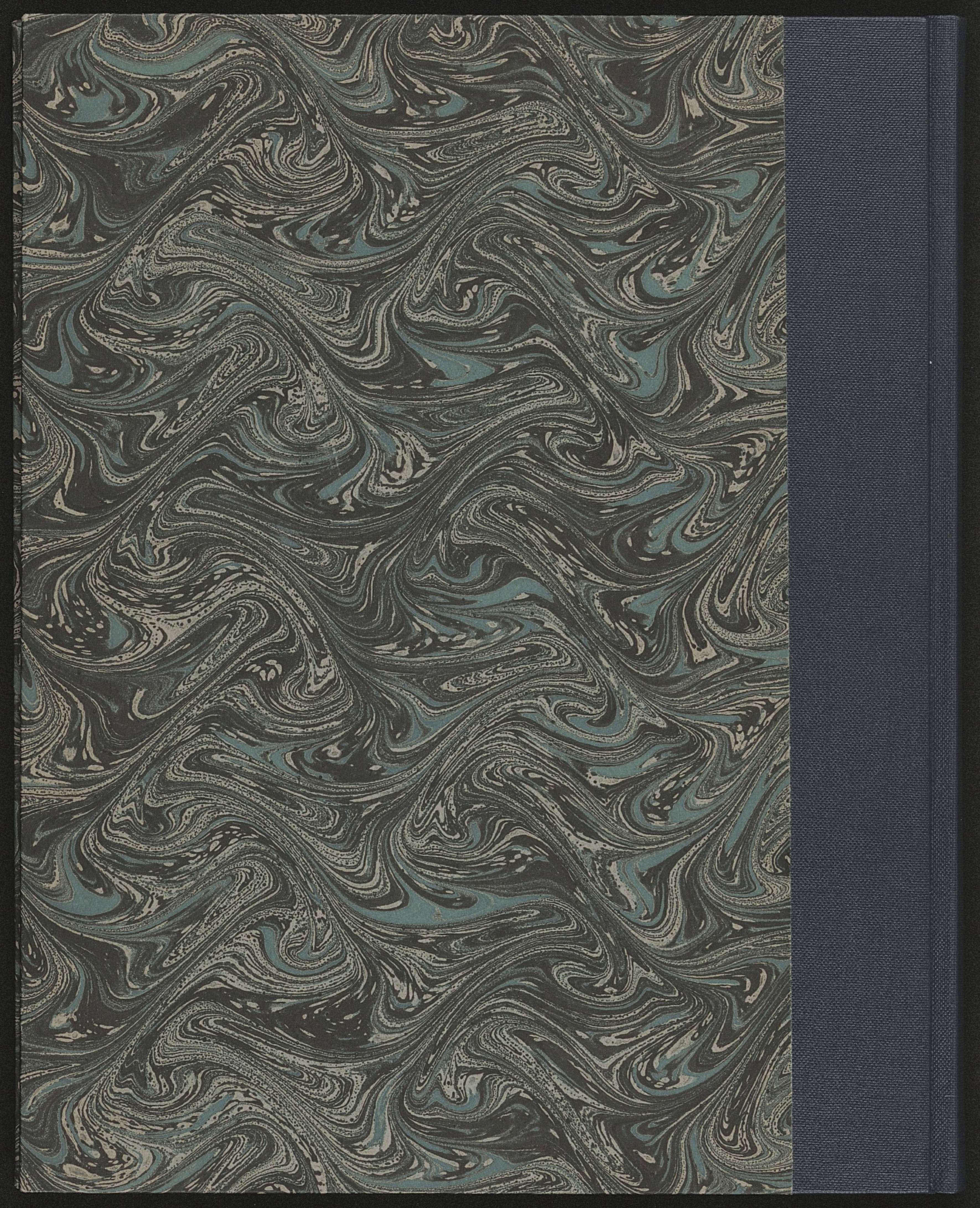
AB	perche terminée par un gros timbre *C* fixé à son extrémité *B*.
M	marteau frappeur fixé à un levier *L* tournant autour d'un axe *o*.
P	masse de plomb fixée à l'extrémité du levier *ll'* pour équilibrer *M*.
R	fort ressort en hélice agissant sur le levier *ll'* pour produire le choc du marteau *M* sur le timbre *C*.
r	petit ressort destiné à éloigner de quelques millimètres le marteau *M* immédiatement après le choc.
KK'	levier tournant autour d'un axe *a* et destiné à être poussé à la main en *K'* dans le sens de la flèche *f*
y	vis régleuse fixée au talon *t* pour limiter le recul du levier *KK'*
FF'	fil de fer unissant le levier *KK'* au levier *L*.
z	vis réglant la tension du fil *FF'*
x	vis réglant la tension du ressort *R*.
i	poignée pour manier et maintenir la perche *AB*.
n	trou pour passer une corde qui retieut la perche *AB*.



TRANSMISSION DU SON DANS L'EAU


IURE
ETREY
ANNE


RELIURE
MENETREY
LAUSANNE



inches | centimeters

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 (A)	12	13	14	15
L*	39.12	65.43	49.87	44.26	55.56	70.82	63.51	39.92	52.24	97.06	92.02	87.34	82.14	72.06	62.15
a*	13.24	18.11	-4.34	-13.80	9.82	-33.43	34.26	11.81	48.55	-0.40	-0.60	-0.75	-1.06	-1.19	-1.07
b*	15.07	18.72	-22.29	22.85	-24.49	-0.35	59.60	-46.07	18.51	1.13	0.23	0.21	0.43	0.28	0.19
Density →										0.04	0.09	0.15	0.22	0.36	0.51

	16 (M)	17	18 (B)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L*	49.25	38.62	28.86	16.19	8.29	3.44	31.41	72.46	72.95	29.37	54.91	43.96	82.74	52.79	50.87
a*	-0.16	-0.18	0.54	-0.05	-0.81	-0.23	20.98	-24.45	16.83	13.06	-38.91	52.00	3.45	50.88	-27.17
b*	0.01	-0.04	0.60	0.73	0.19	0.49	-19.43	55.93	68.80	-49.49	30.77	30.01	81.29	-12.72	-29.46
Density	0.75	0.98	1.24	1.67	2.04	2.42									

D50 Illuminant, 2 degree observer

Golden Thread

Colors by Munsell Color Services Lab

Don Williams

D. COLLADON —— COMPRESSION DES LIQUIDES

